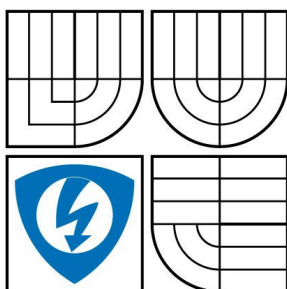


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLGIÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION**

# SPOLEHLIVOST TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ

RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MIROSLAV JIRGL**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2010

## Abstrakt

Tato práce se zabývá spolehlivostí technických systémů. Obsah práce lze rozdělit na čtyři základní části.

První část práce se zabývá matematickým popisem spolehlivosti. K tomu se používá pravděpodobnost a statistika. Obsahuje definici a vlastnosti náhodných jevů, popis diskrétní a spojitě náhodné veličiny a její rozdělení.

Druhá část práce se věnuje definici a vyjádření spolehlivosti, typům poruch v číslicových obvodech a spolehlivosti elektronických součástek. Je úvodem do problematiky spolehlivosti.

Třetí část práce je věnována tvorbě spolehlivostních modelů a spolehlivostním analýzám. U každé metody tvorby spolehlivostního modelu je uvedena její podstata, stručný postup a na závěr její použitelnost, tedy hlavní výhody a nevýhody. Dále jsou podrobněji popsány dvě nejpoužívanější spolehlivostní analýzy - Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA (resp. FMECA) a Analýza stromu poruch FTA.

Poslední část práce obsahuje praktický příklad výpočtu spolehlivosti. Zkoumaným objektem je *Univerzální nabíječ NiMH a NiCd akumulátorů*. Spolehlivost je analyzována pomocí blokového modelu, FTA a FMEA.

## Abstract

This thesis deals with a reliability of technical systems. It is divided into four main parts.

The first part deals with the mathematical description of reliability. Probability and statistics are used for this description. This part includes the definition and properties of random events, the description of discrete and continuous random variable and its distribution.

The second part contains the definition and expression of reliability, types of faults in the digital circuits and the reliability of electronic components. This part introduces into problems of reliability.

The third part includes making the reliability diagrams and reliability analysis. Each method is briefly described here. Further advantages and disadvantages of using each method are given here. The two most widely used reliability analysis - Failure Mode and Effect Analysis - FMEA (resp. FMECA) and Fault Tree Analysis – FTA are described in a greater detail.

The last part focuses on an example of calculation of reliability. An analyzed object is *Universal Charger NiMH and NiCd batteries*. Reliability is analysed by block diagram, FTA and FMEA.

Klíčová slova:

spolehlivost, spolehlivostní ukazatel, intenzita poruch, spolehlivostní model, spolehlivostní analýza, FTA, FMEA, FMECA

Keywords:

reliability, a reliability parameter, failure rate, a reliability block diagram, a reliability analysis, FTA, FMEA, FMECA

Bibliografická citace:

JIRGL, M. *Spolehlivost technických systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 76 s.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spolehlivost technických systémů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **31. května 2010**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **1. června 2010**

.....  
podpis autora

## **OBSAH**

<b>OBSAH.....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. MATEMATICKÝ POPIS SPOLEHLIVOSTI.....</b>	<b>12</b>
1.1 Náhodné jevy .....	12
1.2 Pravděpodobnost .....	13
1.3 Náhodná veličina .....	15
1.3.1 Diskrétní náhodná veličina .....	15
1.3.2 Spojitá náhodná veličina .....	20
<b>2. ÚVOD DO SPOLEHLIVOSTI .....</b>	<b>31</b>
2.1 Základní pojmy .....	31
2.2 Ukazatele spolehlivosti .....	32
2.2.1 Neobnovované objekty .....	32
2.2.2 Ukazatele spolehlivosti obnovovaných objektů .....	37
<b>3. ZÁKLADNÍ PORUCHY V ČÍSLICOVÝCH OBVODECH .....</b>	<b>41</b>
3.1 Poruchy typu t .....	41
3.2 Zkrat mezi signálními vodiči .....	42
3.3 Poruchy obvodů CMOS .....	42
3.4 Poruchy programovatelných logických polí .....	42
3.5 Poruchy pamětí RAM .....	43
<b>4. SPOLEHLIVOST A VLASTNOSTI SOUČÁSTEK .....</b>	<b>44</b>
4.1 Bezporuchovost součástek .....	44
4.2 Spolehlivostní vlastnosti základních součástek .....	45
<b>5. SPOLEHLIVOSTNÍ MODEL Y .....</b>	<b>50</b>
5.1 Blokové spolehlivostní model y .....	50
5.1.1 Sériové spolehlivostní model y .....	51
5.1.2 Paralelní spolehlivostní model y .....	53
5.1.3 Kombinované spolehlivostní model y .....	55

5.2 Markovovy procesy .....	57
5.3 Statistické modelování metodou Monte Carlo .....	59
<b>6. SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY .....</b>	<b>60</b>
6.1 Analýza stromu poruch FTA.....	60
6.2 Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA .....	63
6.3 Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA.....	65
<b>7. PŘÍKLAD SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY .....</b>	<b>66</b>
7.1 Blokový spolehlivostní model Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů .....	67
7.2 Analýza ve formě stromu poruch.....	71
7.3 Analýza FMEA .....	73
<b>8. ANALÝZA CÍLŮ .....</b>	<b>74</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>76</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 : Příklad distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny .....	16
Obrázek 2 : Distribuční funkce spojitě náhodné veličiny .....	21
Obrázek 3: Příklad průběhu hustoty pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny .....	22
Obrázek 4: Průběh hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení .....	24
Obrázek 5: Průběh hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení s vyznačenými směrodatnými odchylkami [ 3] .....	25
Obrázek 6: Hustota pravděpodobnosti při Weibullově rozdělení .....	27
Obrázek 7: Distribuční funkce při Weibullově rozdělení .....	28
Obrázek 8: Distribuční funkce $F(x)$ a $1-F(x)$ pro exponenciální rozdělení.....	30
Obrázek 9: Závislost intenzity poruch na čase [ 1] .....	34
Obrázek 10 : Závislost bezporuchového stavu $R(t)$ a pravděpodobnosti poruchy $Q(t)$ na čase .....	36
Obrázek 11 : Průběh stavů obnovovaného objektu [ 3] .....	37
Obrázek 12: Příklad poruchy typu $t$ ( $t_1$ ) .....	42
Obrázek 13: Sériový spolehlivostní model .....	51
Obrázek 14: Závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému $R_S(t)$ na normovaném čase $\lambda t$ .....	52
Obrázek 15: Paralelní spolehlivostní model .....	53
Obrázek 16: Závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému $R_P(t)$ na normovaném čase $\lambda t$ .....	55
Obrázek 17: Sériově-paralelní spolehlivostní model [ 1] .....	55
Obrázek 18: Paralelně-sériový spolehlivostní model [ 1] .....	56
Obrázek 19: Symboly používané pro konstrukci stromu poruch.....	61
Obrázek 20: Příklad stromu poruch systému .....	62
Obrázek 21: Schéma zapojení Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů. 66	
Obrázek 22 : Blokový spolehlivostní model Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů.....	67
Obrázek 23: Strom poruch Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů.....	72

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : Příklad rozdělení pravděpodobnosti diskrétní náhodné veličiny .....	15
Tabulka 2: Seznam použitých součástek.....	67
Tabulka 3 : Výpočet střední intenzity poruch systému $\lambda_C$ .....	68
Tabulka 4: Zpřesněný výpočet intenzity poruch rezistorů.....	69
Tabulka 5: Zpřesněný výpočet intenzity poruch kondenzátorů .....	70
Tabulka 6: Zpřesněný výpočet intenzity poruch diod.....	70
Tabulka 7: Zpřesněný výpočet intenzity poruch integrovaných obvodů .....	70
Tabulka 8: Zpřesněný výpočet intenzity poruch plošných spojů.....	71
Tabulka 9: Výpočet střední intenzity poruch systému pomocí FTA .....	72

## ÚVOD

Spolehlivost je velice důležitá vlastnost. Je to schopnost daného systému nebo výrobku plnit danou funkci. Důležitá je ovšem nejen pro technické systémy, ale i pro systémy, výrobky a procesy v nejrůznějších oblastech techniky a celého okolí člověka. Protože je však tato práce orientovaná zejména na technické systémy, bude následující text zaměřen zejména na tyto systémy.

Spolehlivost sama o sobě je velice komplexní vlastností, neboť zahrnuje několik aspektů. Jedná se zejména o bezporuchovost, životnost, opravitelnost, apod. . Znalost spolehlivosti systému je třeba velmi často znát již při jeho návrhu, aby se předešlo právě častým poruchám, malé životnosti a tedy nespolehlivosti celého systému. V teorii spolehlivosti, která se zabývá měřením, předpovídáním a řízením spolehlivosti, se velice často používá jako matematický aparát pravděpodobnostní počet a statistika.

Popis spolehlivosti se provádí pomocí spolehlivostních parametrů. Spolehlivostní parametry jsou veličiny, jejichž hodnoty se dají analyticky, numericky nebo empiricky určit. Těmito veličinami je potom vyjádřena míra spolehlivosti systému. Právě výpočtem spolehlivostních ukazatelů se zabývají spolehlivostní analýzy.

Cílem této práce je tedy uvést přehled jednotlivých způsobů, jak spolehlivost daného systému určit, včetně stručného uvedení postupu a použitelnosti. Dále bude uveden praktický příklad analýzy spolehlivosti využitím nejpoužívanějších metod.

## 1. MATEMATICKÝ POPIS SPOLEHLIVOSTI

Nástrojem pro určování spolehlivosti technických systémů jsou pravděpodobnostní vztahy a výpočty spolehlivostních parametrů součástek. Proto se tato kapitola bude zabývat právě některými vybranými partiemi z oboru pravděpodobnosti a jejich použitím.

### 1.1 NÁHODNÉ JEVY

Uvažujme realizaci nějakého experimentu. Pak množinu všech možných výsledků experimentu označíme jako  $\Omega$ . Náhodnými jevy rozumíme výsledky experimentu, které mohou, ale také nemusí nastat. Jsou tedy podmnožinami množiny  $\Omega$  a značíme je velkými písmeny A, B, C, ... [ 5], [ 3]

#### *Vlastnosti náhodných jevů*

K popisu vlastností náhodných jevů se používají matematické operace pro práci s množinami. Některé základní vlastnosti náhodných jevů jsou tedy následující [ 5]:

- *jistý a nemožný jev :*

úplná množina  $\Omega$  znamená jev jistý a množina  $\overline{\Omega}$  znamená jev nemožný.

- *ekvivalence jevů A, B :*

je-li jev A částí jevu B a současně jev B je částí jevu A, pak platí vztah (1.1):

$$A \subset B \wedge B \subset A \Rightarrow A = B \quad (1.1)$$

- *průnik jevů A, B :*

vyjadřuje skutečnost, že jevy A a B nastanou současně, tedy matematický zápis

$$A \cap B \quad (1.2)$$

- *sjednocení jevů A, B:*

vyjadřuje skutečnost, že nastane jev A nebo jev B, matematický zápis:

$$A \cup B \quad (1.3)$$

- opačný jev  $\bar{A}$  k jevu  $A$  :

vyjadřuje rozdíl jevu jistého  $\Omega$  a jevu  $A$ , tedy matematický zápis:

$$\bar{A} = \Omega - A \quad (1.4)$$

- rozdíl jevů  $A, B$  :

vyjadřuje skutečnost, že nastane jev  $A$  a nenastane jev  $B$ , matematický zápis:

$$A - B = A \cdot \bar{B} \quad (1.5)$$

- disjunkce jevů  $A, B$  :

vyjadřuje skutečnost, že jev  $A$  a jev  $B$  nemohou nastat současně, matematický zápis:

$$A \cdot B = 0 \quad (1.6)$$

## 1.2 PRAVDĚPODOBNOST

Pravděpodobnost  $P$  je číslo vyjadřující možnost výskytu náhodného jevu. Pravděpodobnost, že nastane např. jev  $A$ , označíme jako  $P(A)$ .

### ***Klasická pravděpodobnost $P$***

Je použitelná pouze za předpokladu konečné množiny  $\Omega$  a stejné pravděpodobnosti  $P$  všech možných výsledků experimentu. [ 3]

Definována je jako podíl počtu příznivých výsledků experimentu  $|A|$  a počtu všech možných výsledků  $|\Omega|$ , viz vztah :

$$P(A) = \frac{|A|}{|\Omega|} \quad , \text{ kde} \quad (1.7)$$

$|A|$ ...počet příznivých výsledků experimentu,

$|\Omega|$ ...počet všech možných výsledků.

Některé základní vlastnosti pravděpodobnosti [ 5]:

- pravděpodobnost může nabývat hodnot pouze z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$  :  $0 \leq P(A) \leq 1$ ,
- pravděpodobnost opačného jevu  $\bar{A}$  k jevu  $A$  je :  $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ ,

- pravděpodobnost jevu jistého a nemožného :  $P(\Omega) = 1$  ,  $P(\overline{\Omega}) = 0$ ,
- pravděpodobnost sjednocení jevů A a B je dána :  $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cdot B)$  ,  
( pokud jsou A a B disjunktní jevy, pak  $P(AB) = 0$  ).

### ***Podmíněná pravděpodobnost $P(B/A)$***

V případě, že je pravděpodobnost jevu B podmíněná platností jevu A, platí následující vztah :

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (1.8)$$

### ***Úplná pravděpodobnost $P(A)$***

Úplná pravděpodobnost je definována za předpokladu, že existují navzájem disjunktní jevy (hypotézy)  $H_1, H_2, H_3, \dots, H_k$ , pro které platí, že jejich sjednocení dává jev jistý  $\Omega$ , a dále je dán libovolný jev A. [ 5] Je-li tedy známa pravděpodobnost  $P(H_i)$  a  $P(A/H_i)$ , potom úplná pravděpodobnost  $P(A)$ , že nastane jev A, je dána :

$$P(A) = \sum_{i=1}^k P(H_i)P(A/H_i) \quad (1.9)$$

### ***Bayesův vzorec úplné pravděpodobnosti***

K určení podmíněné pravděpodobnosti jevu  $H_k$ , vzhledem k jevu A, tedy  $P(H_k/A)$  se používá tzv. Bayesův vzorec :

$$P(H_k / A) = \frac{P(A / H_k)P(H_k)}{P(A)} \quad (1.10)$$

### 1.3 NÁHODNÁ VELIČINA

Množina všech možných výsledků experimentu  $\Omega$  je množinou hodnot, kterých může nabývat *náhodná veličina*  $X$ . Náhodná veličina tedy popisuje vlastnosti náhodného jevu a její hodnota je určena výsledkem náhodného pokusu (experimentu) [ 5] .

#### *Diskrétní náhodná veličina*

Nabývá-li náhodná veličina  $X$  v daném intervalu konečný počet hodnot, jedná se o tzv. diskrétní náhodnou veličinu.

#### *Spojité náhodná veličina*

Pokud má náhodná veličina  $X$  v daném intervalu spojitý průběh, nazýváme ji spojitá náhodná veličina.

#### 1.3.1 Diskrétní náhodná veličina

Diskrétní náhodná veličina  $X$  je taková veličina, která nemá spojitý charakter, tzn. že jednotlivé body jsou navzájem izolovány. [ 2]

##### 1.3.1.1 Rozdělení diskrétní náhodné veličiny

Rozdělení pravděpodobnosti diskrétní náhodné veličiny může být např. pravděpodobnostní funkcí, kdy  $p(x) = P(X = x)$  nebo formou tabulky, viz. Tabulka 1.

$x_i$	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
$P_i$	$P_1$	$P_2$	...	$P_n$

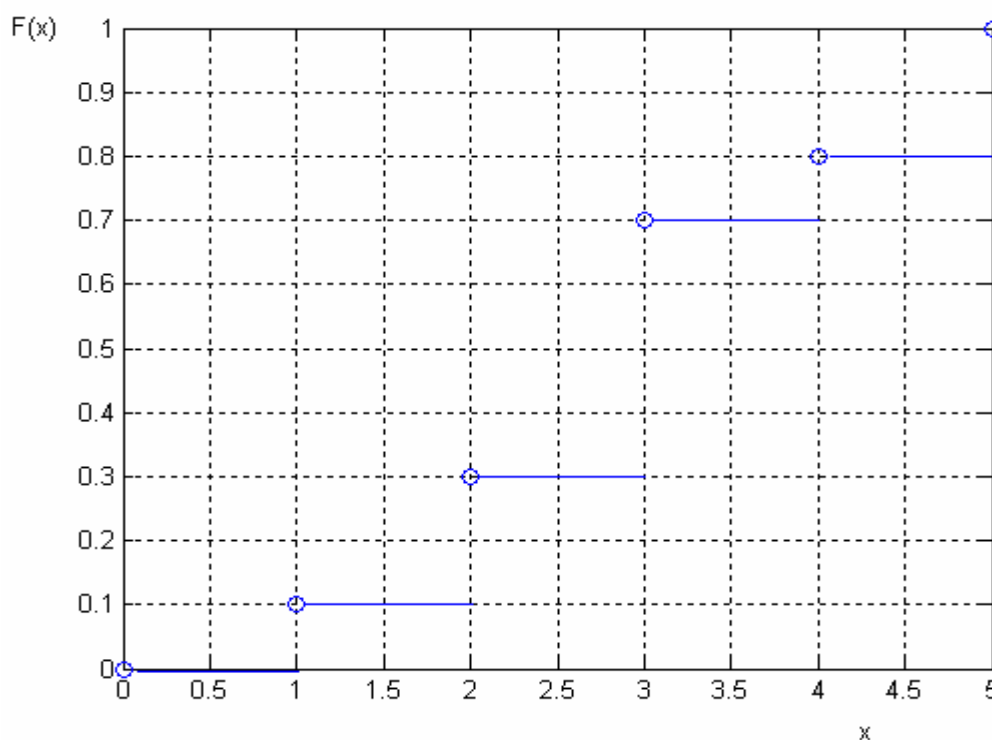
**Tabulka 1 : Příklad rozdělení pravděpodobnosti diskrétní náhodné veličiny**

Nejčastější popis rozdělení diskrétní náhodné veličiny však bývá pomocí *distribuční funkce*  $F(x)$ . Ta je definovaná jako pravděpodobnost, že náhodná veličina

$X$  nabude hodnoty menší než  $x$ . Pro distribuční funkci  $F(x)$  diskrétní náhodné veličiny  $X$  platí :

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} p(x_i) \quad (1.11)$$

Distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny  $F(x)$  má schodovitý tvar a jednotlivé přírůstky v bodech, kde se nachází diskrétní náhodná veličina  $X$ , odpovídají pravděpodobnostem nabytí příslušné hodnoty, viz. Obrázek 1.



**Obrázek 1 : Příklad distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny**

Některé vlastnosti distribuční funkce [ 5]:

- může nabývat hodnot z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ , tedy  $F(x) = \langle 0;1 \rangle$ ,
- je neklesající,
- pro limity platí vztah :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1 \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad (1.12)$$



### **Charakteristiky diskrétní náhodné veličiny**

Pro zjednodušení použití náhodných veličin se používají jejich tzv. *charakteristiky*, které udávají vlastnosti náhodné veličiny (např. její polohu, variabilitu, tvar). [ 3]

Jsou to především *střední hodnota*  $E(X)$  a *rozptyl (disperze)*  $D^2(X)$ .

#### **Střední hodnota $E(X)$**

*Střední hodnota diskrétní náhodné veličiny*  $E(X)$  je základní charakteristikou.

Jak už název napovídá, jde o střed celého rozdělení. Její hodnota je dána vztahem :

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p(x_i) \quad , \text{ kde} \quad (1.13)$$

$x_i \dots$  hodnoty náhodné veličiny,

$p(x_i) \dots$  pravděpodobnosti jednotlivých hodnot náhodných veličin.

#### **Rozptyl $D^2(X)$**

*Rozptyl  $D^2(X)$  diskrétní náhodné veličiny* je vztažen ke střední hodnotě náhodné veličiny a udává míru rozptýlení jednotlivých hodnot. Je dán vztahem :

$$D^2(X) = \sum_{i=1}^n [x_i - E(X)]^2 \cdot p(x_i) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 \cdot p(x_i)] - E^2(X) \quad , \text{ kde} \quad (1.14)$$

$E(X) \dots$  střední hodnota diskrétní náhodné veličiny,

$x_i \dots$  hodnoty náhodné veličiny,

$p(x_i) \dots$  pravděpodobnosti jednotlivých hodnot náhodných veličin.

Rozptýlení se často určuje také pomocí směrodatné odchylky  $\sigma(X)$ :

$$\sigma(X) = \sqrt{D^2(X)} \quad , \text{ kde} \quad (1.15)$$

$D^2(X) \dots$  rozptyl diskrétní náhodné veličiny.

***Důležitá rozdělení diskrétní náhodné veličiny používaná ve spolehlivosti [ 3]***

**Binomické rozdělení**

Binomické rozdělení pravděpodobnosti  $p(x)$  je takové rozdělení, kde příznivý jev při provedení  $n$  experimentů nastane  $x$ -krát, přičemž  $x \leq n$ . Pravděpodobnost  $p$  při  $n$  nezávislých experimentech musí být stejná.

V matematických textech se toto rozložení náhodné veličiny často značí jako  $B_i(n, p)$ . [ 3] Pravděpodobnostní funkce binomicky rozložené náhodné veličiny je potom dána:

$$p(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \text{ kde} \quad (1.16)$$

$x$  ... počet příznivých výsledků,  $x = 0, 1, 2, \dots, n$ ,

$n$  ... počet opakování experimentu,

$p$  ... pravděpodobnost příznivého jevu.

***Střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$  při tomto rozdělení jsou :***

$$E(X) = np \quad (1.17)$$

$$D^2(X) = np(1-p) \quad (1.18)$$

V případě, že  $p \rightarrow 0,5$  při zhruba  $n \geq 30$  můžeme binomické rozdělení nahradit normálním rozdělením.

**Poissonovo rozdělení**

Poissonovo rozdělení se používá pro tzv. velmi řídké jevy, čili pro jevy s velmi malou pravděpodobností výskytu, v určitém intervalu (např. časovém). [ 3] Vydeme-li z předpokladu, že binomické rozdělení má velmi malou pravděpodobnost výskytu sledovaného jevu, čili  $p \rightarrow 0$  a zároveň je proveden velký počet experimentů, čili  $n \rightarrow \infty$  (prakticky  $n \geq 30$ ), můžeme aproximovat toto rozdělení

právě Poissonovým rozdělením, kde  $\lambda=np$ . Pravděpodobnostní funkce při Poissonově rozdělení je tedy :

$$p(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}, \text{ kde} \quad (1.19)$$

$\lambda$ ...reálné číslo vyjadřující součin počtu opakování experimentu  $n$  a pravděpodobnosti výskytu daného jevu ( $\lambda > 0$ ).

***Střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$  při tomto rozdělení jsou :***

$$E(X) = \lambda, \text{ kde} \quad (1.20)$$

$\lambda$ ...reálné číslo vyjadřující součin počtu opakování experimentu  $n$  a pravděpodobnosti výskytu daného jevu.

$$D^2(X) = \lambda, \text{ kde} \quad (1.21)$$

$\lambda$ ...reálné číslo vyjadřující součin počtu opakování experimentu  $n$  a pravděpodobnosti výskytu daného jevu ( $\lambda > 0$ ).

Často nás v praxi více zajímá, jestli daný jev nastane při  $n$  experimentech nanejvýš  $x$ -krát, respektive jestli nastane více než  $x$ -krát. To lze vyjádřit vztahy (1.22) a (1.23) :

$$P(X \leq x) = \sum_{i=0}^x \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}, \quad (1.22)$$

$$P(X > x) = \sum_{i=x+1}^n \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}, \text{ kde} \quad (1.23)$$

$\lambda$ ...reálné číslo vyjadřující součin počtu opakování experimentu  $n$  a pravděpodobnosti výskytu daného jevu ( $\lambda > 0$ ).

### 1.3.2 Spojitá náhodná veličina

Spojitá náhodná veličina  $X$  je taková veličina, která má spojitý charakter, tzn. že jednotlivé body nejsou navzájem izolovány. [ 2]

#### 1.3.2.1 Rozdělení spojitě náhodné veličiny

Rozdělení spojitě náhodné veličiny bývá také popisováno distribuční funkcí  $F(x)$  ve tvaru :

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(\tau) d\tau \quad , \text{ kde} \quad (1. 24)$$

$F(x)$  ... distribuční funkce,

$P(X \leq x)$  ... pravděpodobnost,

$f(x)$  ... hustota pravděpodobnosti.

Vlastnosti distribuční funkce spojitě náhodné veličiny jsou podobné vlastnostem distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny.

Některé vlastnosti distribuční funkce jsou [ 5]:

- distribuční funkce  $F(x)$  může nabývat hodnot :  $F(x) = \langle 0 ; 1 \rangle$

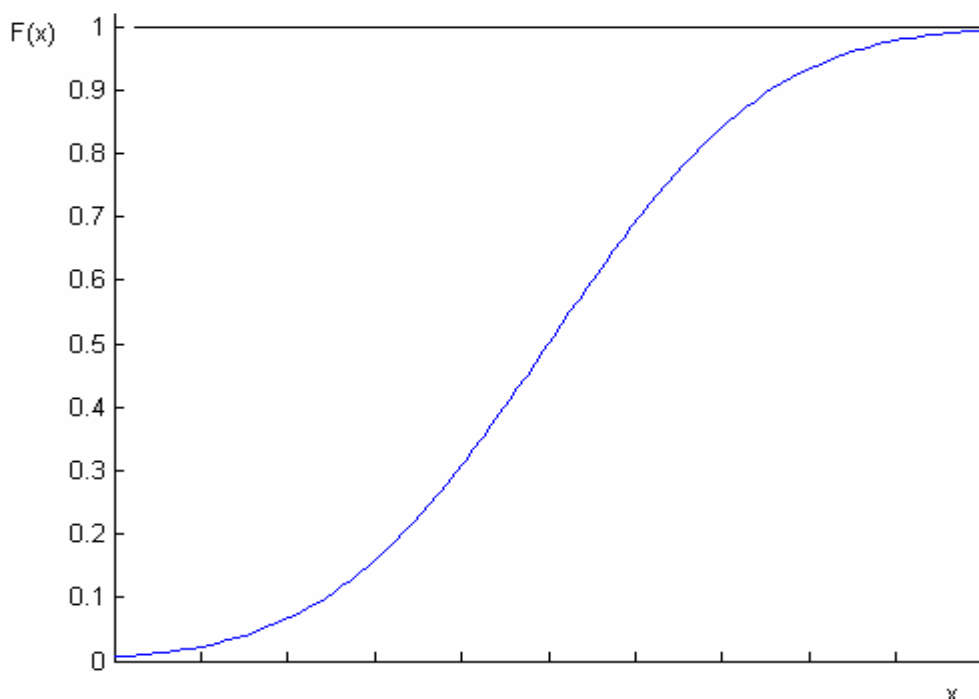
- je neklesající

- pro limity platí :  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$        $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$

- pravděpodobnost  $P(x)$  z intervalu  $(a,b)$  je  $P(a < x < b) = F(b) - F(a)$

- distribuční funkce  $F(x)$  v intervalu  $\langle a,b \rangle$  je  $F(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx$

Příklad distribuční funkce spojitě náhodné veličiny je uveden na obrázku Obrázek 2.



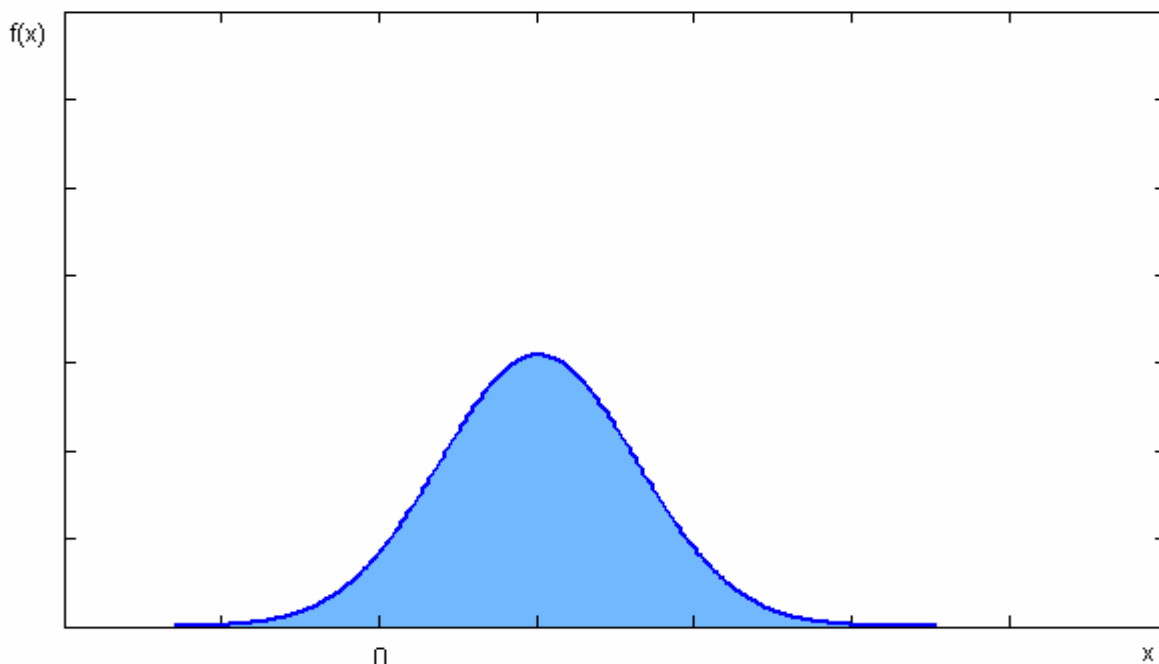
**Obrázek 2 : Distribuční funkce spojitě náhodné veličiny**

### ***Hustota pravděpodobnosti $f(x)$***

Vztah mezi hustotou pravděpodobnosti  $f(x)$  a distribuční funkcí  $F(x)$  vychází ze vztahu (1.17). Hustota pravděpodobnosti  $f(x)$  je tedy derivací distribuční funkce  $F(x)$ . Tedy :

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (1.25)$$

Pro hustotu pravděpodobnosti dále platí :  $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$



**Obrázek 3: Příklad průběhu hustoty pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny**

### 1.3.2.2 Charakteristiky spojité náhodné veličiny

Ze stejného důvodu, jako tomu bylo i u diskrétní náhodné veličiny, se i pro spojitou náhodnou veličinu zavádějí charakteristiky střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$  a také zde mají stejný význam.

***Střední hodnota spojité náhodné veličiny  $E(X)$ :***

$$E(X) = \int_a^b x \cdot f(x) dx \quad , \text{ kde} \quad (1. 26)$$

$a, b \dots$  meze (interval vyšetřovaného oboru),  
 $f(x) \dots$  hustota pravděpodobnosti.

***Rozptyl spojité náhodné veličiny  $D^2(X)$  :***

$$D^2(X) = \int_a^b [x - E(X)]^2 \cdot f(x) dx \quad , \text{ kde} \quad (1. 27)$$

a, b ... meze intervalu vyšetřovaného oboru,  
 $f(x)$  ... hustota pravděpodobnosti.

### ***1.3.2.3 Důležitá rozdělení spojité náhodné veličiny používaná ve spolehlivosti***

#### **Normální rozdělení**

Normální rozdělení je jedno z nejdůležitějších rozdělení spojité náhodné veličiny. Jeho zvláštnost je, že se jím dá za určitých podmínek aproximovat spousta jiných rozdělení, ať už spojité, či diskrétní náhodné veličiny. [ 3] Bývá označováno jako Gaussovo rozdělení.

U tohoto typu rozdělení se střední hodnota náhodné veličiny značí jako  $\mu$  a rozptyl jako  $\sigma^2$ . V matematických textech se toto rozložení náhodné veličiny často značí jako  $N(\mu, \sigma^2)$ . [ 3]

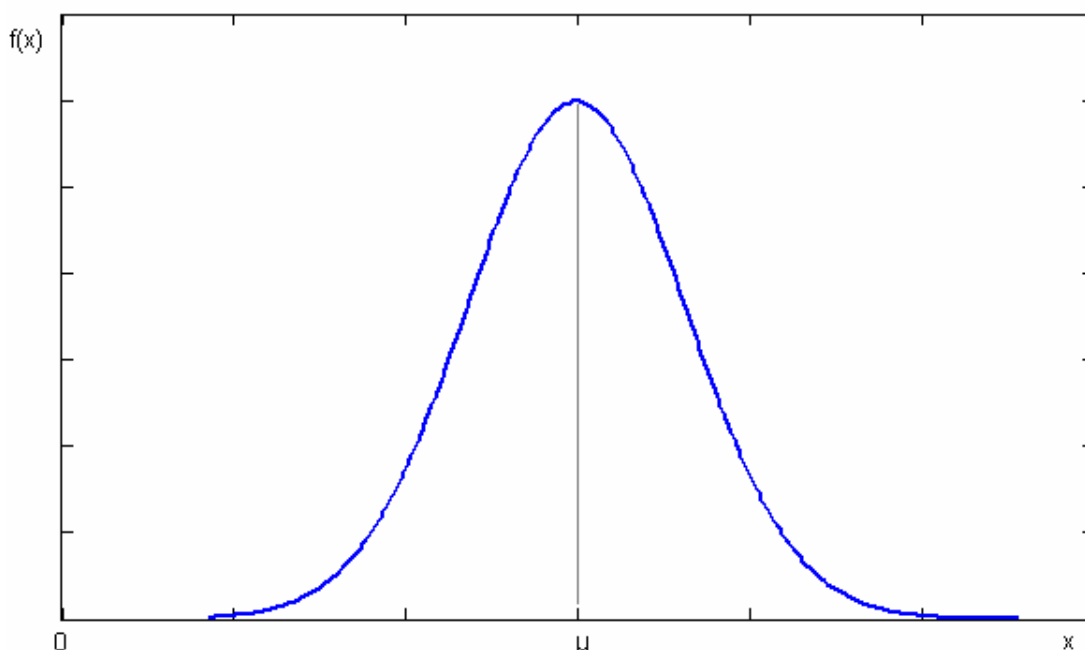
Hustota pravděpodobnosti  $f(x)$  normálního rozdělení je dána vztahem :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \quad , \text{ kde} \quad (1.28)$$

$\sigma^2$  ... rozptyl náhodné veličiny,

$\mu$  ... střední hodnota náhodné veličiny při normálním rozdělení,

$x$  ... náhodná veličina.



**Obrázek 4: Průběh hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení**

Průběh funkce hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení  $f(x)$ , viz. Obrázek 4 se nazývá Gaussova křivka. Z tohoto průběhu je zřejmé, že při vzdalování hodnoty náhodné veličiny od střední hodnoty  $\mu$  klesá její pravděpodobnost. Toto rozdělení se používá zejména u náhodných proměnných, jež jsou ovlivňovány velkým počtem faktorů, z nichž žádný výrazně nepřevládá [ 3].

***Střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$  :***

$$E(X) = \mu \quad , \quad (1.29)$$

$$D^2(X) = \sigma^2 \quad , \text{ kde } (1.30)$$

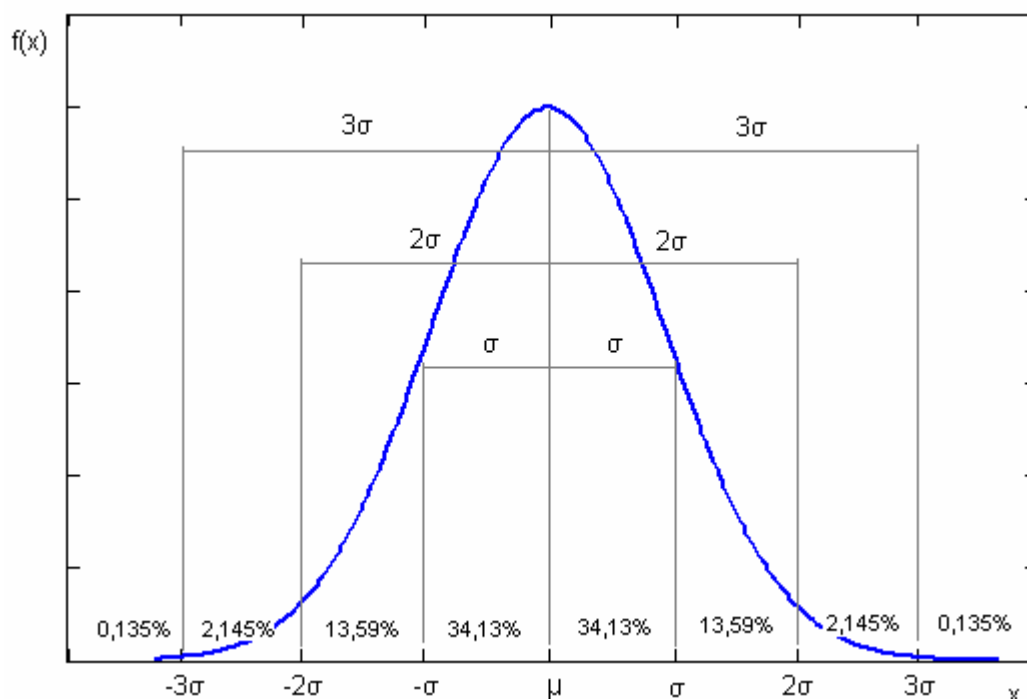
$\mu$ ...střední hodnota normálního rozdělení,

$\sigma^2$ ...rozptyl při normálním rozdělení.



Z obrázku Obrázek 4 vyplývají následující vlastnosti funkce hustoty  $f(x)$  normálního rozložení:

- 99,73% plochy pod křivkou leží v rozsahu  $6\sigma$  ( $\pm 3\sigma$ ),
- 95,45% plochy pod křivkou leží v rozsahu  $4\sigma$  ( $\pm 2\sigma$ ),
- 68,26% plochy pod křivkou leží v rozsahu  $2\sigma$  ( $\pm \sigma$ ).



**Obrázek 5: Průběh hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení s vyznačenými směrodatnými odchylkami [ 3]**

### Normované normální rozdělení

Zvláštním případem normálního rozdělení je  $N(0,1)$  označované jako normované normální rozdělení. Střední hodnota tohoto rozdělení je tedy  $\mu = 0$  a rozptyl  $\sigma^2 = 1$ .

Toto rozdělení často nahrazuje obecné normální rozdělení z důvodu jednodušších výpočtů a řešení. [ 2]

Zavádí se substituce  $u$  :

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma}, \text{ kde} \quad (1.31)$$

$\mu$ ...střední hodnota normálního rozdělení,

$\sigma$ ...směrodatná odchylka,

$x$ ...náhodná veličina.

Hustota pravděpodobnosti se značí jako  $\varphi(u)$  a distribuční funkce jako  $\Phi(u)$ .

Hodnoty těchto funkcí jsou vyjádřené pomocí substituce (1.24) jako :

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (1.32)$$

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{1}{2} y^2\right) dx \quad (1.33)$$

Distribuční funkce  $\Phi(u)$  je tabelovaná a jednoduše se její pomocí počítají praktické úlohy. Někdy je ovšem tato hodnota tabelovaná pro jiné meze. Potom je třeba použít přepočet.

Je-li definována jako  $\Phi(x)$  v mezích  $< 0 ; x >$ , potom :  $\Phi(u) = \Phi(x) + 0.5$  (1.34)

Je-li definovaná jako  $\Phi(z)$  v mezích  $< -z ; z >$ , potom :  $\Phi(u) = \frac{\Phi(z) + 1}{2}$  (1.35)

### Weibullovo rozdělení

Ve spolehlivostní analýze se používá pro systémy s nekonstantní intenzitou poruch.[ 3] Je to trojparametrické rozdělení s parametry :

- $a$  ...parametr stupnice
- $b$  ...parametr tvaru
- $c$  ...parametr polohy

Při běžném použití se pokládá  $c = 0$  a použije se vyjádření pouze pomocí parametrů  $a$  a  $b$ . Hustota pravděpodobnosti je dána :

$$f(x) = \frac{b}{a} \cdot x^{(b-1)} \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^b, \text{ kde} \quad (1.36)$$

$a$ ...parametr stupnice,

$b$ ...parametr tvaru.,

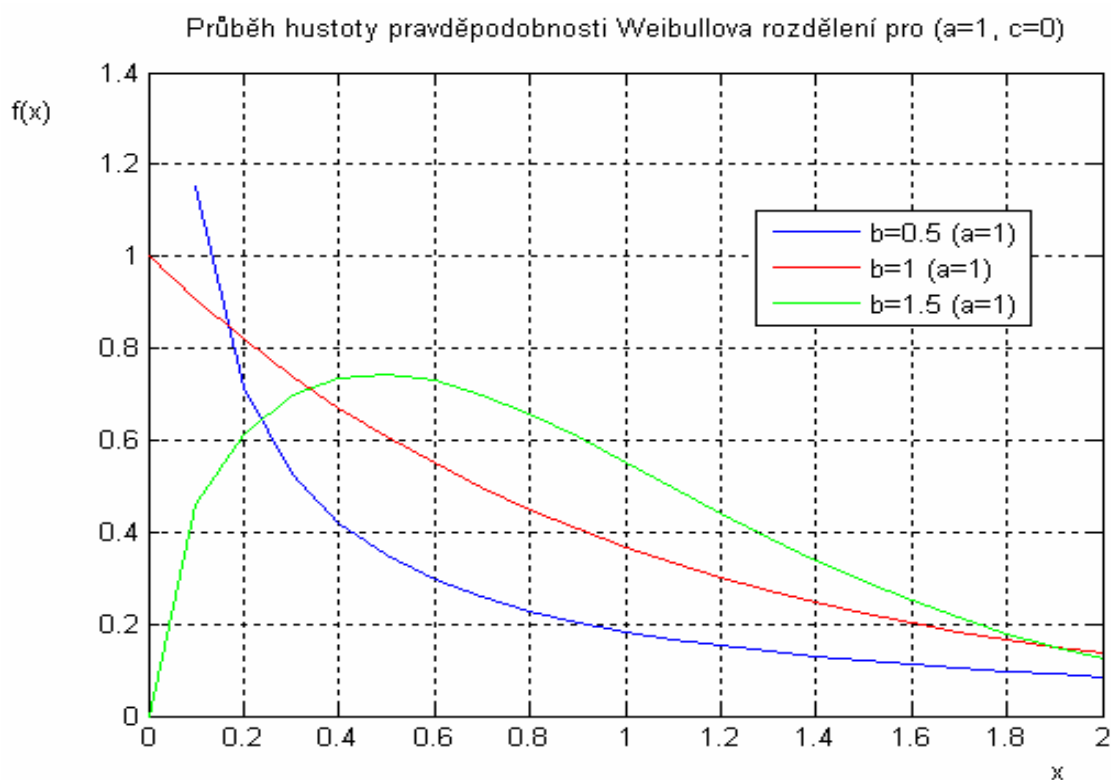
$x$ ...náhodná veličina.

**Distribuční funkce :**

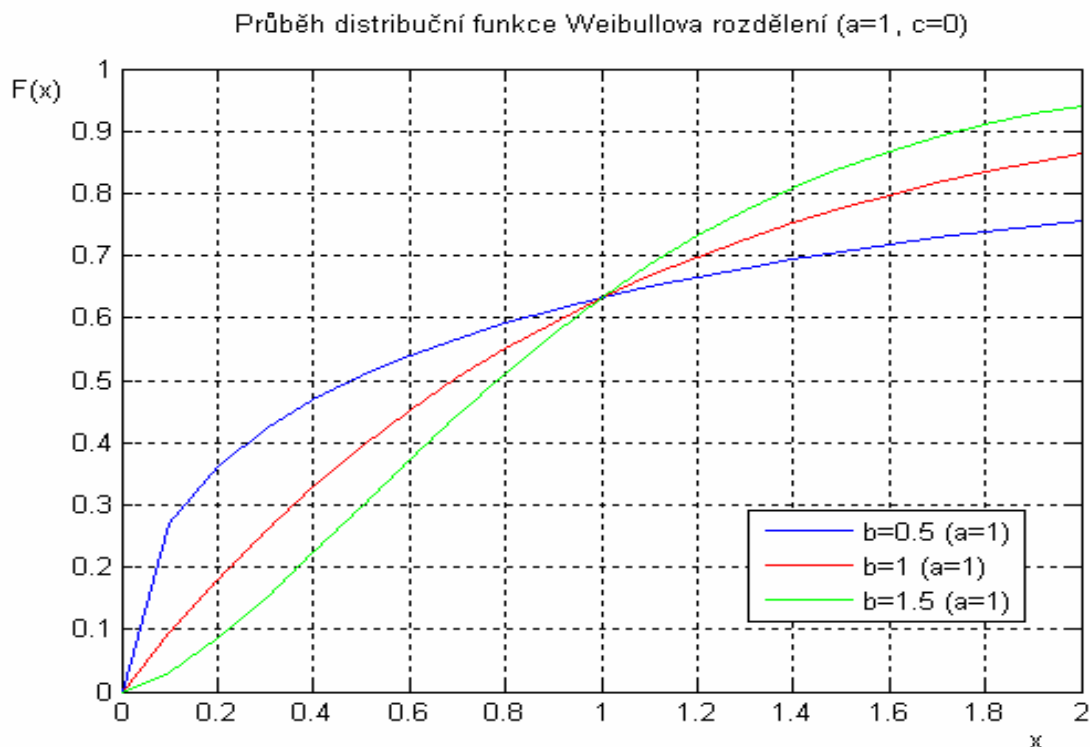
$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{a}\right)^b, \text{ kde} \quad (1.37)$$

$a, b$ ...parametry

$x$  ... náhodná veličina.



**Obrázek 6: Hustota pravděpodobnosti při Weibullově rozdělení**



Obrázek 7: Distribuční funkce při Weibullově rozdělení

**Charakteristiky tohoto rozdělení** (střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$ ) :

$$E(X) = a^{\frac{1}{b}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) \quad , \quad (1.38)$$

$$D^2(X) = a^{\frac{2}{b}} \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{2}{b} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{b} + 1\right) \right] \quad , \text{ kde} \quad (1.39)$$

$a, b \dots$  parametry rozdělení,

$$\Gamma(z) \dots \text{ funkce gama} : \quad \Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \exp(-t) dt \quad .$$

Pokud  $z=n$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ), potom  $\Gamma(z)=(n-1)!$  .

### Exponenciální rozdělení

Je to velice často používané rozdělení ve spolehlivosti. Jeho vlastnosti popisují bezporuchovost výrobku. Jeho parametrem je  $\lambda$ , jež právě ve spolehlivosti označuje intenzitu poruch. Další jeho předností je jednoduchost výpočtu. [ 5]

**Hustota pravděpodobnosti  $f(x)$  exponenciálního rozdělení :**

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x) \quad , \text{ kde} \quad (1.40)$$

$\lambda \dots$  parametr rozdělení,

$x \dots$  náhodná veličina.

**Střední hodnota  $E(X)$  a rozptyl  $D^2(X)$  exponenciálního rozdělení:**

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad , \quad (1.41)$$

$$D^2(X) = \frac{1}{\lambda^2} \quad , \text{ kde} \quad (1.42)$$

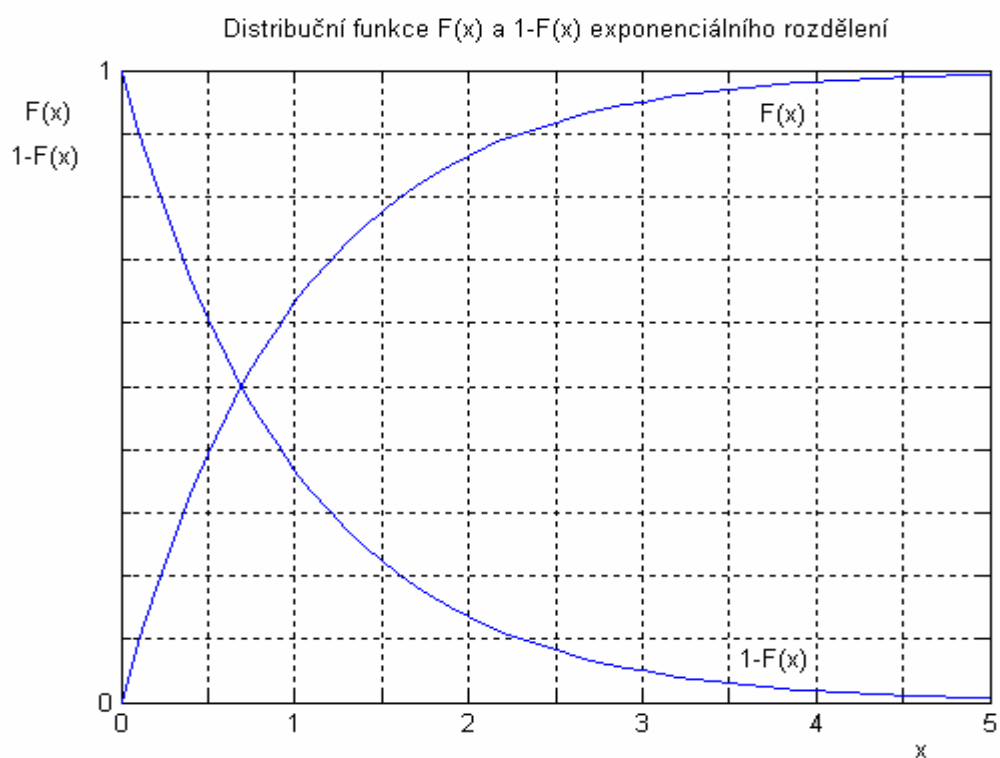
$\lambda \dots$  parametr rozdělení.

**Distribuční funkce  $F(x)$ :**

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x) \quad , \text{ kde} \quad (1.43)$$

$\lambda \dots$  parametr rozdělení

$x \dots$  náhodná veličina



**Obrázek 8: Distribuční funkce  $F(x)$  a  $1-F(x)$  pro exponenciální rozdělení**

## 2. ÚVOD DO SPOLEHLIVOSTI

Problematika spolehlivosti se odvíjí od požadavků na správnou a pokud možno bezporuchovou (resp. co nejméně poruchovou) funkci technických (elektrotechnických) zařízení. [ 2]

Spolehlivost je definována normou ČSN 01 0102 jako : Obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek. [ 1]

### 2.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Pro studium spolehlivosti je nutné dále definovat několik základních pojmů vyskytujících se v tomto oboru, tudíž i v následujícím textu. Zde jsou uvedeny 3 základní pojmy a jejich definice :

#### 1. **Objekt** (anglicky object)

Objekt je velice obecný pojem a dosazuje se za něj právě zkoumaný libovolně velký nebo libovolně malý celek, který je právě zkoumán, např. obvod, součástka, systém,...

#### 1. **Porucha** (anglicky fault)

Porucha je podle normy ČSN 01 0102 „Názvosloví spolehlivosti v elektrotechnice“ jev spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci podle technických podmínek.

#### 2. **Chyba** (anglicky error)

Chyba je definována jako rozdíl mezi správnou a skutečnou hodnotou nějaké veličiny zjištěný měřením nebo pozorováním. Chyba je vždy důsledkem nějaké poruchy, avšak porucha se vždy nemusí projevit chybou, taková porucha se označuje jako latentní.

## 2.2 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI

Spolehlivost se nedá sama o sobě číselně vyjádřit, neboť je to velmi komplexní vlastnost. Proto se spolehlivost vyjadřuje pomocí tzv. spolehlivostních ukazatelů, jakožto veličin, které lze jednotlivě vyhodnocovat. Všechny ukazatele spolehlivosti mají náhodný charakter a tudíž se k vyjádření těchto ukazatelů a tedy i spolehlivosti používají veličiny používané v pravděpodobnostním počtu. [ 8]

Vyjádření spolehlivosti závisí zejména na tom, bude-li daný objekt za provozu obnovován do původního bezporuchového stavu, či ne. Podle toho se dělí objekty na obnovované a neobnovované. Obnovou se přitom rozumí přechod z poruchového do bezporuchového stavu. [ 1], [ 3]

### 2.2.1 Neobnovované objekty

Náhodná veličina, zde označovaná jako  $\tau$ , se charakterizuje pomocí distribuční funkce  $F(t)$ , vyjádřené vztahem :

$$F(t) = P(t < \tau) \quad , \text{ kde} \quad (2.1)$$

$F(t)$  ...distribuční funkce,

$P(x)$ ...pravděpodobnost jevu  $x$ ,

$t$ ...nezáporné reálné číslo.

V teorii spolehlivosti bývá parametrem  $t$  časový interval mezi uvedením objektu do provozu a poruchou. Pokud je  $t$  čas měření od uvedení do provozu, pak zde distribuční funkce udává pravděpodobnost poruchy do času  $t$  a značí se  $Q(t)$ . [ 1]

Zavádí se zde také pojem pravděpodobnost bezporuchového stavu  $R(t)$ , který je vyjádřen jako doplněk distribuční funkce  $Q(t)$  do jedničky. Pravděpodobnost bezporuchového stavu  $R(t)$  je tedy dána vztahem :

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad , \text{ kde} \quad (2.2)$$

$R(t)$  ... pravděpodobnost bezporuchového stavu,

$Q(t)$ ...pravděpodobnost poruchy do času  $t$ .



Pokud bude náhodná veličina spojitá, zavádí se její další důležité charakteristiky. První z nich je hustota pravděpodobnosti  $f(t)$  označovaná ve spolehlivosti jako hustota poruch. [ 1]

Určí se jako derivace pravděpodobnosti poruchy  $Q(t)$  podle času :

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad , \text{ kde} \quad (2.3)$$

$f(t)$  ... hustota pravděpodobnosti,

$Q(t)$ ... pravděpodobnost poruchy do času  $t$ .

Další z nich je intenzita náhodné veličiny  $\lambda(t)$  označovaná ve spolehlivosti jako intenzita poruch. Je to jedna z nejdůležitějších, v praxi používaných, ukazatelů spolehlivosti. [ 1] Za předpokladu, že dosud nedošlo k poruše, udává  $\lambda(t)$  podmíněnou hustotu poruch. Určí se podle vztahu (2.4) :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} \quad , \text{ kde} \quad (2.4)$$

$\lambda(t)$  ... intenzita poruch,

$Q(t)$ ... pravděpodobnost poruchy,

$R(t)$ ... pravděpodobnost bezporuchového stavu.

Souvislost dosud zavedených ukazatelů je možné vyjádřit postupným dosazováním vztahu (2.2) do (2.3) a poté do (2.4). Potom lze popsat diferenciální rovnicí (2.5):

$$-\lambda(t)dt = \frac{dR(t)}{R(t)} \quad , \text{ kde} \quad (2.5)$$

$\lambda(t)$  ... intenzita poruch,

$R(t)$ ... pravděpodobnost bezporuchového stavu.

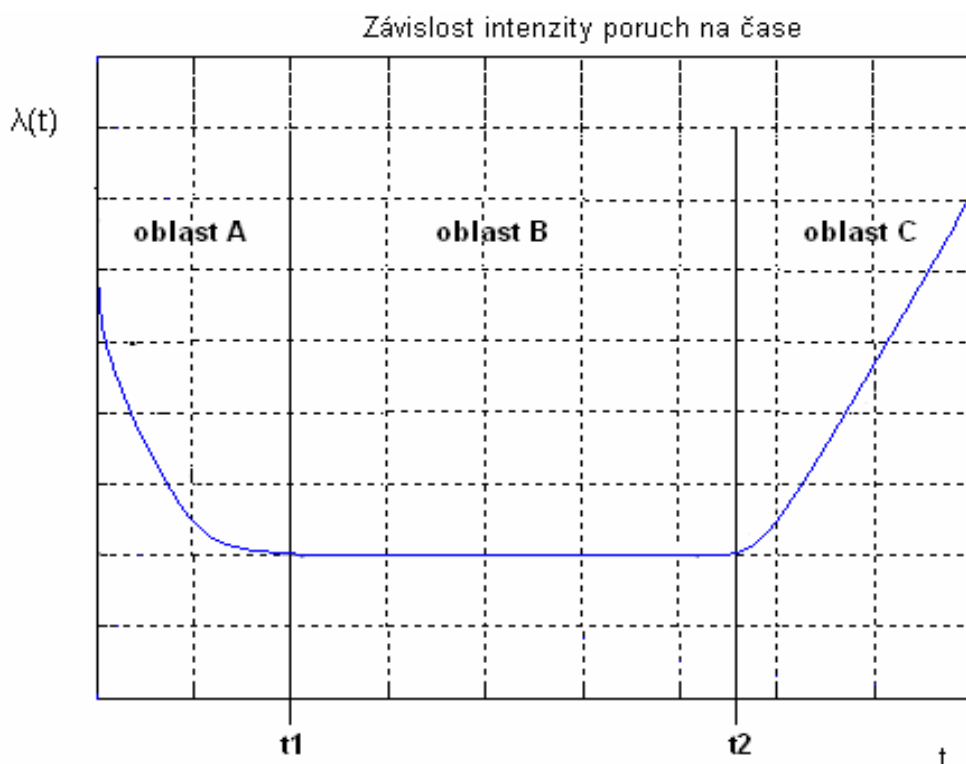
Řešením rovnice (2.5) je její integrace a výsledkem je vztah (2.6).

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right), \text{ kde} \quad (2.6)$$

$\lambda(t)$  ... intenzita poruch,

$R(t)$ ... pravděpodobnost bezporuchového stavu.

Konkrétnější řešení je bez znalosti závislosti intenzity poruch na čase  $\lambda(t)$  prakticky nemožné. Empiricky byla však tato závislost popsána tzv. vanovou křivkou znázorněné na obrázku Obrázek 9: Závislost intenzity poruch na čase.



Obrázek 9: Závislost intenzity poruch na čase [ 1]

Na obrázku Obrázek 9: Závislost intenzity poruch na čase je znázorněn již zmíněný průběh vanové křivky s vyznačením třech oblastí A, B a C. [ 3]

**Oblast A - *Etapa časných poruch***

Intenzita poruch je dána především vlivem materiálových vad a nedokonalostí výrobní technologie. Řádově trvá několik desítek až stovek hodin. V této oblasti by měl výrobce nechat výrobek ve zkušebním provozu.

**Oblast B - *Etapa ustáleného provozu***

Intenzita poruch v této oblasti je dána především vlivem náhodných poruch. Řádově trvá několik desítek tisíc hodin.

**Oblast C - *Etapa stárnutí***

Dochází k nárůstu intenzity poruch vlivem stárnutí objektu.

Intenzita poruch  $\lambda(t)$  je v časovém intervalu  $\langle t_1, t_2 \rangle$ , tedy v oblasti B, konstantní. Z toho vyplývá, že pokud budeme analyzovat spolehlivost v tomto časovém intervalu  $\langle t_1, t_2 \rangle$ , můžeme dosazením konstanty za  $\lambda(t)$  vypočíst vztah (2.6).

Z něj vyplývá hledaná vzájemná souvislost uvedených ukazatelů spolehlivosti, viz. vztahy (2.7) až (2.9) :

***Hustota poruch :***

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t) \quad , \text{ kde} \quad (2.7)$$

$\lambda$ ...intenzita poruch (konstanta) .

***Pravděpodobnost poruchy Q(t) :***

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad , \text{ kde} \quad (2.8)$$

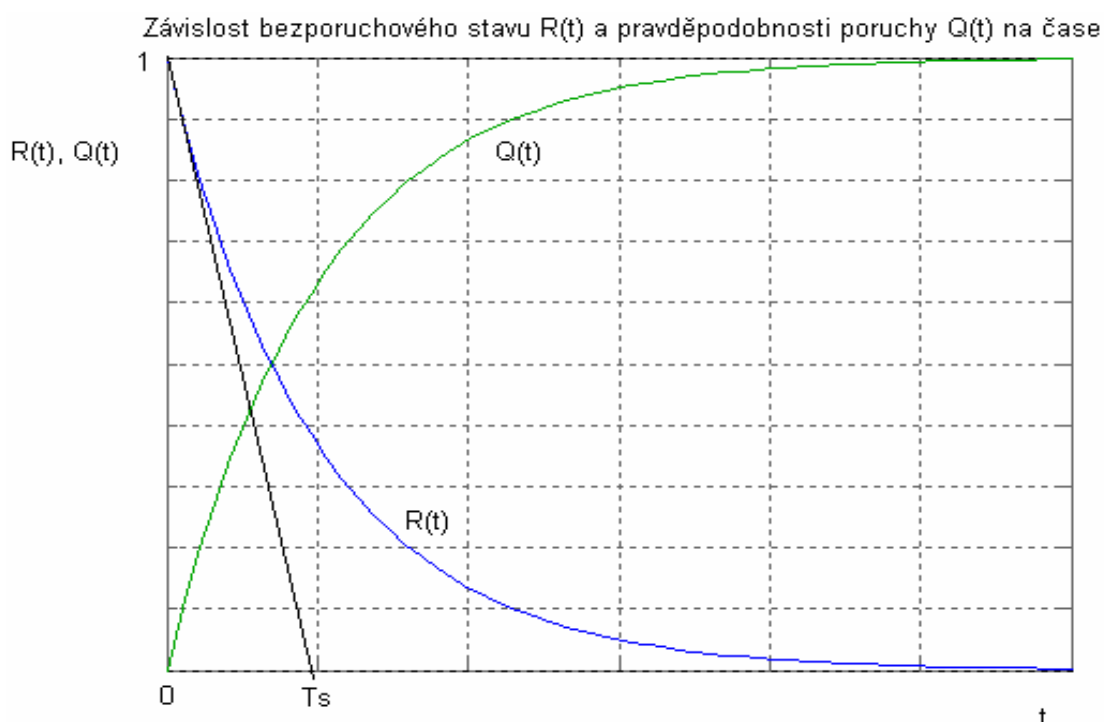
$\lambda$ ...intenzita poruch (konstanta) .

***Pravděpodobnost bezporuchového stavu :***

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad , \text{ kde} \quad (2.9)$$

$\lambda$ ...intenzita poruch (konstanta) .

Uvedené vztahy (2.7) až (2.9) popisují exponenciální zákon poruch. Z obrázku Obrázek 10 : Závislost bezporuchového stavu  $R(t)$  a pravděpodobnosti poruchy  $Q(t)$  na čase je zřejmé, že v čase  $t = 0$  je pravděpodobnost poruchy  $Q(t) = 0$ . Z toho vyplývá, že exponenciální zákon poruch počítá s bezporuchovým počátečním stavem. Pravděpodobnost poruchy  $Q(t)$  pak s časem exponenciálně narůstá. [ 8]



**Obrázek 10 : Závislost bezporuchového stavu  $R(t)$  a pravděpodobnosti poruchy  $Q(t)$  na čase**

#### ***Střední doba bezporuchového provozu***

Ze závislosti bezporuchového stavu  $R(t)$  na čase resp. pravděpodobnosti poruchy  $Q(t)$  na čase lze určit další velmi významný ukazatel spolehlivosti. Nazývá se střední doba bezporuchového provozu  $T_s$  (viz. Obrázek 10 : Závislost bezporuchového stavu  $R(t)$  a pravděpodobnosti poruchy  $Q(t)$  na čase). Obecně se určí jako střední hodnota spojitě náhodné veličiny, v tom případě jako :

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (2.10)$$

$R(t)$ ...pravděpodobnost bezporuchového stavu.

Pro exponenciální průběh  $R(t)$  se hodnota  $T_s$  určí jako :

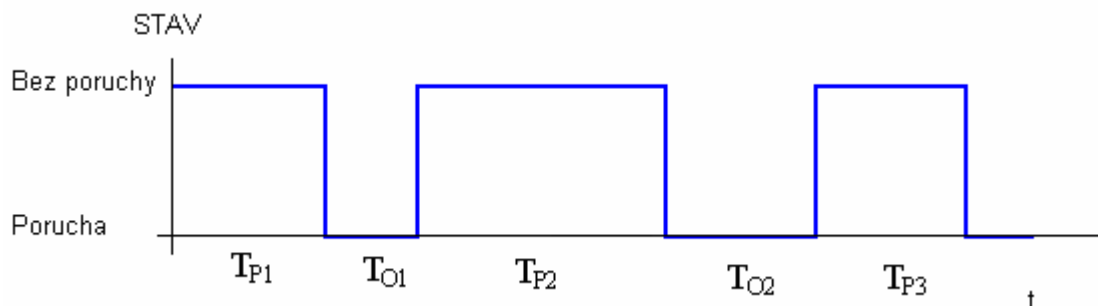
$$T_s = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (2.11)$$

$\lambda$ ...intenzita poruch (konstanta).

Konstantní hodnota intenzity poruch  $\lambda$  je závislá na mnoha okolnostech, zejména na druhu a vlastnostech objektu. Např. u číslicových integrovaných obvodů se tato hodnota pohybuje okolo  $10^{-7} \text{ h}^{-1}$ . [ 2]

### 2.2.2 Ukazatele spolehlivosti obnovovaných objektů

Obnovované objekty, jak již z názvu vyplývá, jsou takové objekty, u nichž dochází během jejich života k obnově z poruchového do bezporuchového stavu. Při uvedení objektu do provozu se uvažuje bezporuchový stav objektu. Průběh stavů po uvedení objektu do provozu je naznačen na obrázku Obrázek 11 : Průběh stavů obnovovaného objektu, kde  $i$ -tá doba provozu je  $T_{Pi}$  a  $i$ -tá doba obnovy (opravy) je  $T_{Oi}$ . [ 1]



**Obrázek 11 : Průběh stavů obnovovaného objektu [ 3]**

### ***Celková doba provozu $t_p$***

Určí se jako součet jednotlivých dob provozu :

$$t_p = \sum_{i=1} T_{pi} \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (2.12)$$

$T_{pi} \dots i$ -tá doba provozu.

### ***Celková doba obnovy $t_o$***

Určí se jako součet jednotlivých dob obnovy :

$$t_o = \sum_{i=1} T_{oi} \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (2.13)$$

$T_{oi} \dots i$ -tá doba obnovy.

### ***Střední doba mezi poruchami $T_s$***

U obnovovaných objektů se zavádí namísto střední doby bezporuchového provozu, jakož tomu bylo u neobnovovaných objektů, střední doba mezi poruchami  $T_s$ . Ta se určí jako aritmetický průměr dob obnovy  $T_o$  vždy od konce opravy do výskytu další poruchy, viz Obrázek 11. [ 3] Střední doba mezi poruchami  $T_s$  je dána vztahem:

$$T_s = \frac{t_p}{n} \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (2.14)$$

$t_p \dots$  kumulativní doba provozu (viz. vztah (2.12)),

$n \dots$  počet výpadků způsobených poruchami.

### ***Intenzitu poruch $\lambda$***

U obnovovaných objektů lze chápat intenzitu poruch  $\lambda$  jako střední frekvenci poruch systému. Je totiž vyjádřena jako převrácená hodnota střední doby mezi poruchami  $T_s$ , tedy :

$$\lambda = \frac{1}{T_s} \quad [s^{-1}] \quad , \text{ kde} \quad (2.15)$$

$T_s \dots$  střední doba mezi poruchami.

Pro charakterizování okamžité či dlouhodobé použitelnosti objektu se definují důležité dva součinitele, a sice součinitel prostoje  $K_n(t)$  a okamžitý součinitel pohotovosti  $K_p(t)$ . Někdy je taktéž uveden součinitel technického využití  $K_v$

### ***Okamžitý součinitel pohotovosti $K_p(t)$***

Tento součinitel představuje pravděpodobnost, že v daném čase  $t$  bude objekt schopen provozu. Často se udává jako tzv. stacionární součinitel pohotovosti  $K_p$ , představující hodnotu pravděpodobnosti, že daný objekt bude v ustáleném provozním režimu, tedy pro  $t \rightarrow \infty$ , schopen provozu v libovolném časovém okamžiku. Je dán podílem kumulativních dob, viz. vztah (2.16) [ 1 ] :

$$K_p = \frac{t_p}{t_p + t_o} \quad [-] \quad , \text{ kde} \quad (2.16)$$

$t_p$  ...kumulativní doba provozu,

$t_o$  ...kumulativní doba opravy.

### ***Součinitel prostoje $K_n(t)$***

Tento součinitel představuje pravděpodobnost, že v daném čase  $t$  nebude objekt schopen provozu. Z toho vyplývá, že součinitel prostoje  $K_p(t)$  je vlastně doplňkem okamžitého součinitele pohotovosti  $K_p(t)$  na hodnotu 1 [ 1 ] :

$$K_n(t) = 1 - K_p(t) \quad [-] \quad , \text{ kde} \quad (2.17)$$

$K_p(t)$ ...okamžitý součinitel pohotovosti.

### ***Stacionární součinitel prostoje $K_n$***

Stejně jako u okamžitého součinitele pohotovosti  $K_p(t)$  se definuje stacionární součinitel prostoje  $K_n$ , definovaný pro ustálený provozní režim, čili pro  $t \rightarrow \infty$ . Udává tedy hodnotu pravděpodobnosti, že daný objekt nebude v libovolném časovém okamžiku schopen provozu. [ 1 ] Je definován jako :

$$K_n = 1 - K_p = 1 - \frac{t_p}{t_p + t_o} = \frac{t_o}{t_p + t_o} \quad [-] \quad , \text{ kde} \quad (2.18)$$

$t_p$  ...kumulativní doba provozu,

$t_o$  ...kumulativní doba opravy,

$K_p(t)$ ...okamžitý součinitel pohotovosti.

### ***Součinitel technického využití $K_{tv}$***

Tento součinitel je definován podobně jako stacionární součinitel pohotovosti  $K_p$ , navíc však zahrnuje ještě tzv. kumulativní dobu plánované údržby  $t_u$ . Určí se podle vztahu (2.19).

$$K_{tv} = \frac{t_p}{t_p + t_o + t_u} \quad [-] \quad , \text{ kde} \quad (2.19)$$

$t_p$  ...kumulativní doba provozu,

$t_o$  ...kumulativní doba opravy,

$t_u$  ...kumulativní doba plánované údržby.



### 3. ZÁKLADNÍ PORUCHY V ČÍSLICOVÝCH OBVODECH

Tato část se bude zabývat nejčastějšími typy poruch, ke kterým dochází u číslicových obvodů. Definují se zde dva základní typy poruchy: fyzikální a logická. Zatímco fyzikální porucha je jev, ke kterému v obvodu opravdu došlo, jako např. zkrat apod., logická porucha je jakýmsi modelem fyzikální poruchy, která bývá vyjádřena pomocí logických proměnných a jejich hodnot. [ 1], [ 2]

#### 3.1 PORUCHY TYPU T

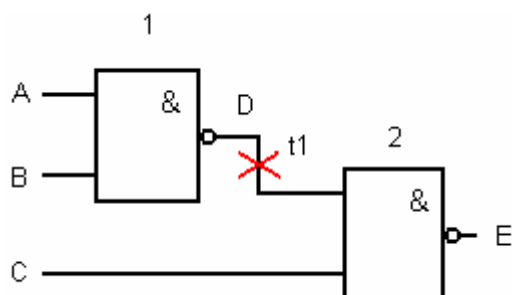
Jedná se o trvalé poruchy typu trvalá logická jednička ( $t1$ ) nebo trvalá logická nula ( $t0$ ).

**Trvalá nula** ( $t0$ ) je porucha projevující se konstantní nulovou hodnotou na určitém vodiči. Může být způsobena např. zkratem daného vodiče na zemnicí vodič.

**Trvalá jednička** ( $t1$ ), obdobně jako trvalá nula, se projevuje konstantní hodnotou logické jedničky na určitém vodiči. Může být způsobena např. zkratem daného vodiče na zdroj napájecího napětí.

Porucha typu  $t$  je tedy definovaná jako připojení zdroje logické úrovně do místa působení poruchy. Předpokládá se tedy, že všechny logické členy pracují správně a porucha působí na vedení. Touto poruchou se dá namodelovat většina poruch, které se mohou v praxi vyskytnout.

U obvodů s TTL logikou se odpojený vstup chová, jako by na něj byl připojen zdroj logické jedničky. Dojde-li tedy např. k přerušení vodiče, jak je znázorněno na obrázku Obrázek 12, bude na vstup obvodu NAND číslo 2 přivedena trvale logická jednička, nezávisle na výstupu D, společně se signálem C.



Obrázek 12: Příklad poruchy typu  $t$  ( $t_1$ )

### 3.2 ZKRAT MEZI SIGNÁLNÍMI VODIČI

Poruchu typu zkrat mezi signálními vodiči je možné reprezentovat použitím fiktivního logického členu. Například u technologie TTL se zkrat výstupů dvou logických členů stejného výkonu chová jako fiktivní logický součin, protože nula převládá nad jedničkou.

Porucha typu zkratované signální vodiče je velmi odlišná od poruchy typu  $t$  a tudíž ji v tomto případě většinou nelze jako poruchu typu  $t$  modelovat.

### 3.3 PORUCHY OBVODŮ CMOS

U obvodů typu CMOS se mimo poruchy typu  $t$  a zkratu signálních vodičů vyskytují i jiné typy poruch způsobené zejména porušením komplementárnosti funkce tranzistorů typu N a P. Jedná se zejména o poruchu vodičů, tedy o tzv. poruchu typu přerušení.

### 3.4 PORUCHY PROGRAMOVATELNÝCH LOGICKÝCH POLÍ

U programovatelných logických polí (PLA) hrozí nebezpečí nadbytečného vazebního členu (tranzistoru) nebo naopak zničení vazebního členu, který měl být

přítomen. U polí typu AND-OR se mohou tyto poruchy vyskytovat jak v součtové, tak i v součinnové matici. Některé tyto poruchy se dají modelovat jako poruchy typu  $t$  ( $t0$ ,  $t1$ ), avšak ne všechny. Ostatní je třeba modelovat samostatně.

### 3.5 PORUCHY PAMĚTÍ RAM

Polovodičové paměti typu RAM mají na rozdíl od logických integrovaných obvodů pravidelnou strukturu. Tyto paměti se skládají z velkého počtu aktivních prvků, z čehož plyne i vznik nových zdrojů poruch. Je tedy nutné nejprve upřesnit modely poruch.

Paměti se skládají z paměťové matice, která je vlastním nosičem informace a dále z řady složitých obvodů, které mohou být taktéž zdrojem poruch.

Podle toho, kde porucha vzniká se poruchy pamětí dělí na poruchy paměťové matice a poruchy vzniklé mimo paměťovou matici.

#### ***Poruchy paměťové matice :***

- pasivní poruchy (ovlivňují chování v ustáleném stavu),
- aktivní poruchy (vznikají během přechodných dějů),
- poruchy paměťové buňky bez ohledu na stav okolí (stejně jako u logických obvodů poruchy  $t0$ ,  $t1$ ),
- poruchy závislé na stavu okolí (nemožnost zapsání 0 nebo 1, pokud je v okolí 1 nebo 0),
- ...

#### ***Poruchy mimo paměťovou matici:***

- poruchy adresových dekodérů,
- zkrat,
- průrazy a svody na vstupech,
- hromadění náboje v dlouhých sběrnicích,
- ...

## 4. SPOLEHLIVOST A VLASTNOSTI SOUČÁSTEK

Spolehlivost jednotlivých součástek je velice důležitá, neboť ovlivňuje spolehlivost

zařízení jako celku. Proto je bezporuchovost součástek velice důležitou a zásadní vlastností.

### 4.1 BEZPORUCHOVOST SOUČÁSTEK

Bezporuchovost součástek závisí zejména na technologickém provedení, provozním prostředí a funkčním použití. [ 3], [ 6]

Informace o bezporuchovosti součástky se může lišit u jednotlivých výrobců. Tyto rozdíly vznikají nejčastěji rozdílnými podmínkami při testování spolehlivosti a použitím různých kritérií. Informace o bezporuchovosti by měly být porovnatelné, pokud výrobce uvede následující údaje :

- intenzitu poruch,
- kritérium poruch,
- podmínky, při kterých byla intenzita poruch stanovena,
- meze věrohodnosti.

Klíčovou roli při určování spolehlivosti součástek hraje namáhání součástky za provozu. Namáhání může být působeno vnitřními nebo vnějšími vlivy, popřípadě jejich kombinací. Namáhání součástek způsobují zejména tyto vlivy : teplota, vlhkost, prach, mechanické namáhání a vibrace a nejrůznější druhy záření.

Tyto vlivy mají tedy na bezporuchovost součástek zásadní vliv a proto by měly být při konstrukci zařízení zohledněny. [ 3]

### ***Střední hodnota intenzity poruch $\lambda_{st}$ :***

Při návrhu a konstrukci elektrického zařízení často ještě nejsou známy provozní podmínky, kterým bude výrobek (zařízení) vystaven. V tomto případě je za základ pro hodnocení bezporuchovosti součástek považována střední hodnota intenzity poruch  $\lambda_{st}$  určená pro následující podmínky :

- teplota okolí :  $t = 50^{\circ}\text{C}$ ,
- zatížení : 50% jmenovitého zatížení,
- prostředí : pozemní, neklimatizované.

Někdy se také uvádí maximální hodnota intenzity poruch  $\lambda_{max}$  a minimální hodnota intenzity poruch  $\lambda_{min}$  definované za specifických podmínek. [ 3], [ 6]

## **4.2 SPOLEHLIVOSTNÍ VLASTNOSTI ZÁKLADNÍCH SOUČÁSTEK**

Spolehlivostní vlastnosti jednotlivých součástek se určují pomocí jejich tzv. spolehlivostních modelů, které jsou vyjádřeny pomocí střední intenzity poruch  $\lambda_s$  a několika různých součinitelů. [ 6]

### ***Integrované obvody a paměti***

Spolehlivostní model pro integrované obvody je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_L (\lambda_{ST} k_T + \lambda_{SE} k_E) \quad , \text{ kde} \quad (4.1)$$

$k_L$ ... činitel nedostatečného zvládnutí výrobního procesu,

$k_E$ ... činitel vlivu provozního prostředí,

$k_T$ ... činitel vlivu teploty čipu (přechodu),

$\lambda_{ST}$ ...střední intenzita poruch vyvolaných mechanismy závislými na teplotě čipu (hodnota se odvíjí od stupně integrace),

$\lambda_{SE}$ ...střední intenzita poruch vyvolaných mechanismy závislými na ostatních vlivech prostředí (odvíjí se od stupně integrace).

U nově zavedených integrovaných obvodů do výroby se pro počáteční období počítá s hodnotou činitele vyjadřujícího nedostatečného zvládnutí výrobního procesu  $k_L = 10$ . S postupem času, tzn. během půl roku až 3 let, klesá tato hodnota až na  $k_L = 1$ . [ 3] Hodnota činitele vlivu teploty čipu  $k_T$  je určen pro teplotu čipu  $v_{\varepsilon}$  danou součtem teploty okolí  $v_O$  a provozního oteplení čipu  $\Delta v$ , viz. vztah :

$$v_{\varepsilon} = v_O + \Delta v \quad [^{\circ}\text{C}] \quad , \text{ kde} \quad (4. 2)$$

$v_{\varepsilon}$  ...teplota čipu,

$v_O$  ...teplota okolí,

$\Delta v$ ...provozní oteplení čipu.

Pokud není provozní oteplení čipu  $\Delta v$  známo, dosazují se následující hodnoty:

- bipolární integrované obvody (méně než 30 hradel) :  $\Delta v = 10^{\circ}\text{C}$ ,
- bipolární integrované obvody a paměti (více než 30 hradel) :  $\Delta v = 25^{\circ}\text{C}$ ,
- integrované obvody typu MOS (méně než 30 hradel) :  $\Delta v = 5^{\circ}\text{C}$ ,
- integrované obvody typu MOS a paměti (více než 30 hradel) :  $\Delta v = 13^{\circ}\text{C}$ .

### Rezistory

Spolehlivostní model pro rezistory je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_Z k_R k_E \lambda_s \quad , \text{ kde} \quad (4. 3)$$

$k_Z$ ... činitel závislosti intenzity poruch na teplotě a zatížení,

$k_R$ ... činitel závislosti rychlosti degradace na jmenovité hodnotě odporu,

$k_E$ ... činitel vlivu provozního prostředí,

$\lambda_s$ ...střední intenzita poruch.

Malovýkonové rezistory o hodnotách mezi  $100\Omega$  až  $10\text{k}\Omega$  jsou jedny z nejspolehlivějších součástek vůbec. U rezistorů dochází vlivem prostředí k oxidaci odporové vrstvy, popř. odporového drátu, což představuje jeden z nejčastějších mechanismů vzniku poruch. [ 3]

Činitel závislosti rychlosti degradace na jmenovité hodnotě odporu  $k_R$  je významný zejména u součástek s větší jmenovitou hodnotou odporu a je dán vztahem :

$$k_R = 1000 \cdot R^{1,5} \quad , \text{ kde} \quad (4.4)$$

$R$ ... jmenovitý odpor rezistoru [ $M\Omega$ ].

### Kondenzátory

Spolehlivostní model pro kondenzátory je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_z k_c k_e \lambda_s \quad , \text{ kde} \quad (4.5)$$

$k_z$ ... činitel závislosti intenzity poruch na teplotě a zatížení,

$k_c$ ... činitel závislosti intenzit poruch na jmenovité hodnotě kapacity,

$k_e$ ... činitel vlivu provozního prostředí,

$\lambda_s$ ... střední intenzita poruch.

Kondenzátory, jako jedny z mála součástek, nevydávají při provozu teplo. Jejich teplota je určena téměř výhradně teplotou okolí. Činitel závislosti intenzity poruch na teplotě a zatížení  $k_z$  tedy představuje zejména závislost na provozním zatížení. [ 3]

S rostoucí jmenovitou hodnotou kapacity kondenzátorů mírně narůstá intenzita poruch. Tuto skutečnost vyjadřuje právě činitel závislosti intenzit poruch na jmenovité hodnotě

kapacity  $k_c$ , vyjádřený vztahem :

$$k_c = A \cdot C^B \quad , \text{ kde} \quad (4.6)$$

$C$ ... jmenovitá hodnota kapacity [ $\mu F$ ] ,

$A, B$ ... konstanty, jejichž hodnota závisí na druhu kondenzátoru.

### ***Cívky a transformátory***

Spolehlivostní model pro cívky a transformátory je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_z k_E \lambda_s, \text{ kde} \quad (4.7)$$

$k_z$ ... činitel závislosti intenzity poruch na teplotě a zatížení,

$k_E$ ... činitel vlivu provozního prostředí,

$\lambda_s$ ...střední intenzita poruch.

Nejvýraznější faktor ovlivňující spolehlivost cívek a transformátorů je především spolehlivost izolace. Poškodí-li se izolace, dochází k elektrickým průrazům izolačního systému, což je nejčastější poruchou těchto součástek. [ 3]

### ***Diskrétní polovodičové součástky***

Spolehlivostní model pro tyto součástky je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_T k_U k_E \lambda_s, \text{ kde} \quad (4.8)$$

$k_U$ ... činitel závislosti na napětovém namáhání,

$k_E$ ... činitel vlivu provozního prostředí,

$k_T$ ... činitel vlivu teploty přechodu,

$\lambda_s$ ...střední intenzita poruch.

U těchto součástek je velice důležité jejich chlazení. Činitel závislosti na napětovém namáhání  $k_U$  hraje velmi významnou roli zejména u diod a tranzistorů.

[ 3] Při stejných provozních podmínkách dosahují malovýkonové součástky podstatně menší intenzity poruch  $\lambda$  než výkonové součástky.

### ***Plošné spoje***

Spolehlivostní model pro plošné spoje je dán vztahem:

$$\lambda_p = k_E N \lambda_s, \text{ kde} \quad (4.9)$$

$N$ ... počet pokovených otvorů,

$k_E$ ... činitel vlivu provozního prostředí,



$\lambda_S$ ...střední intenzita poruch.

Spolehlivost desek plošných spojů závisí zejména na použité technologii vytvoření pokovených otvorů a na materiálu desky.

## 5. SPOLEHLIVOSTNÍ MODELY

Je-li navrhován zejména složitější systém, je třeba znát jeho výslednou spolehlivost. Velký význam je na spolehlivost kladen zejména při návrhu systému pro tzv. kritické aplikace, kde ukazatele spolehlivosti dosahují mezních hodnot, které by neměly být překročeny. Pro hodnocení spolehlivosti systémů existuje řada metod. Většina z nich využívá tzv. spolehlivostní modely. [ 3], [ 2]

Spolehlivostní modely představují grafické nebo matematické vyjádření fyzického systému. Jsou-li prvky systému nezávislé, používají se blokové spolehlivostní modely. V případě závislých prvků systémů se používají nejčastěji Markovovy procesy. Dalšími modely mohou být statistické modelování metodou Monte Carlo nebo model ve formě stromu poruch.

### 5.1 BLOKOVÉ SPOLEHLIVOSTNÍ MODELY

Každý prvek systému přispívá k jeho celkové nespolehlivosti. To, jakým způsobem k tomu dochází, lze znázornit pomocí blokového spolehlivostního modelu, kde každý blok představuje právě jeden prvek. V každém z těchto bloků jsou uvedeny informace o názvu prvku a intenzitě poruch  $\lambda$ . Propojení bloků je realizováno tzv. orientovanými cestami směřujícími od vstupu k výstupu systému. Jsou-li všechny prvky ležící alespoň na jedné z cest mezi vstupem a výstupem provozuschopné, považuje se celý systém za bezporuchový. [ 3]

Celý systém se dá tedy namodelovat pomocí bloků a výsledné hodnoty spolehlivostních parametrů se snadno určí pomocí pravděpodobnostního počtu. Nejčastěji se řeší pravděpodobnost současného výskytu několika nezávislých jevů pomocí součinu pravděpodobností jednotlivých jevů. [ 1]

### 5.1.1 Sériové spolehlivostní modely

Jedná se o uspořádání prvků systému do série. Porucha jediného prvku způsobí poruchu celého systému. Sériový spolehlivostní model nelze chápat jako obvodové sériové zapojení. Tento model pouze představuje fakt, jak jednotlivé prvky přispívají k nespolehlivosti daného systému. Sériový spolehlivostní model je znázorněn na obrázku Obrázek 13 .



**Obrázek 13: Sériový spolehlivostní model**

#### *Pravděpodobnost bezporuchového stavu sériového systému :*

Pokud má každý prvek  $B_i$  pravděpodobnost bezporuchového provozu  $R_i(t)$ , je výsledná pravděpodobnost bezporuchového provozu celého systému  $R_S(t)$  dána jejich součinem, viz vztah :

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad , \text{ kde} \quad (5.1)$$

$R_i(t)$ ...pravděpodobnost bezporuchového provozu  $i$ -tého prvku.

Pokud bude pro každý prvek systému uvažována konstantní intenzita poruch  $\lambda_i$ , bude pravděpodobnost bezporuchového stavu celého systému dána vztahem :

$$R_S(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) = \exp(-\lambda_S t) \quad , \text{ kde} \quad (5.2)$$

$\lambda_S$ ...intenzita poruch celého systému, je dána součtem intenzit poruch jednotlivých prvků  $\lambda_i$  ,

$t$ ...čas.

V případě stejné hodnoty intenzity poruch  $\lambda_i$  každého prvku se pravděpodobnost bezporuchového stavu systému vyjádří vztahem :

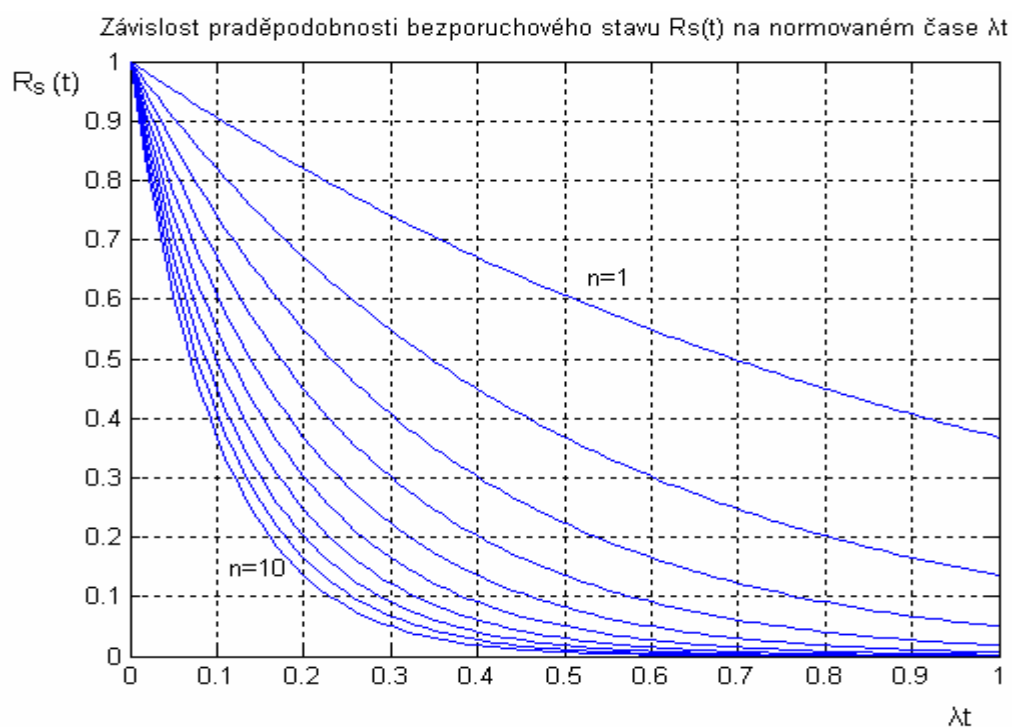
$$R_S(t) = \exp(-n\lambda t) \quad , \text{ kde} \quad (5.3)$$

$\lambda$ ...intenzita poruch (stejná pro všechny prvky systému),

$t$ ...čas,

$n$ ...počet prvků systému.

Pro měnící se počet prvků  $n$  je závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému  $R_S(t)$  na tzv. normovaném čase  $\lambda t$  znázorněna na obrázku Obrázek 14.



**Obrázek 14: Závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému  $R_S(t)$  na normovaném čase  $\lambda t$**

***Střední doba bezporuchového stavu sériového systému:***

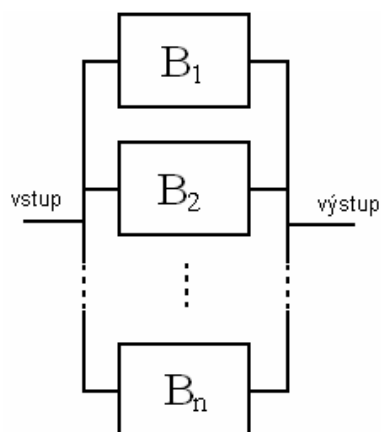
Střední doba bezporuchového provozu systému je dána vztahem :

$$T_s = \frac{1}{\lambda_s} \quad [s] \quad , \text{ kde} \quad (5.4)$$

$\lambda_s$  ...intenzita poruch systému.

**5.1.2 Paralelní spolehlivostní modely**

Jedná se o uspořádání prvků systému paralelně, tedy do jednotlivých větví. K poruše systému může dojít jen v případě, že dojde k poruše všech prvků systému, což je méně pravděpodobné než u sériového modelu. Přesto se samotné paralelní modely příliš nevyskytují. [ 1]



**Obrázek 15: Paralelní spolehlivostní model**

***Pravděpodobnost poruchy paralelního systému:***

Jak již bylo řečeno, porucha systému může nastat pouze v případě, že dojde k poruše všech prvků. Pravděpodobnost poruchy systému  $Q_P(t)$  je dána součinem pravděpodobností poruchy  $Q_i(t)$  jednotlivých bloků  $B_i$ , viz následující vztah :

$$Q_P(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) \quad , \text{ kde} \quad (5.5)$$

$Q_i(t)$ ...pravděpodobnost poruchy  $i$ -tého prvku.

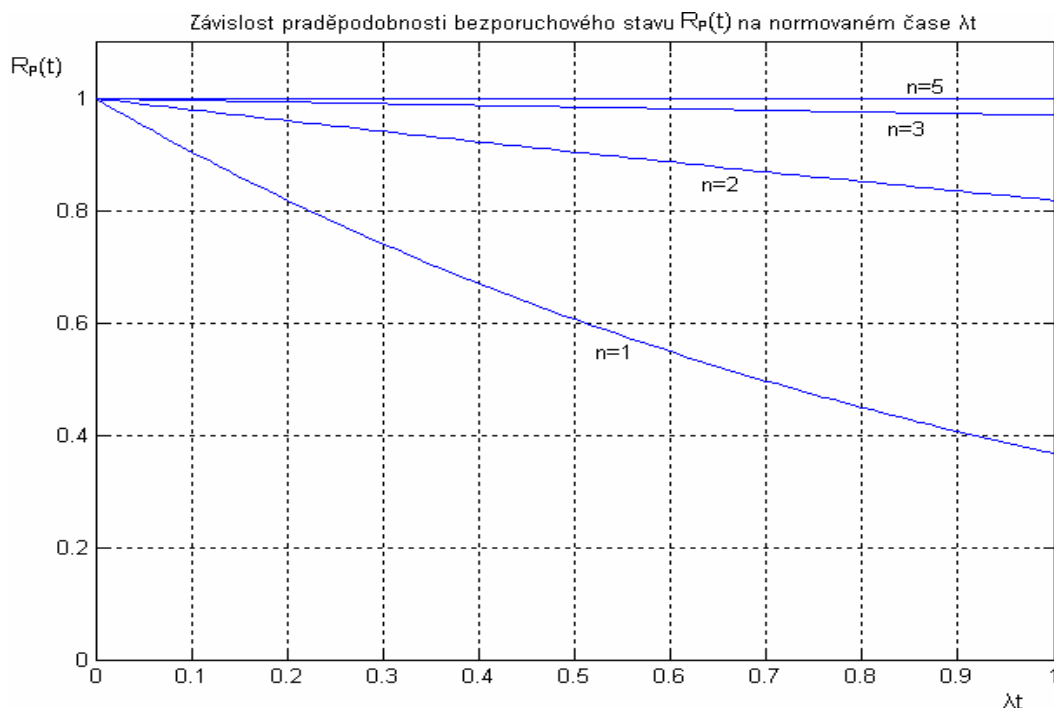
**Pravděpodobnost bezporuchového provozu paralelního systému:**

Pravděpodobnost bezporuchového provozu systému  $R_P(t)$  se určí jako doplněk pravděpodobnosti poruchy systému  $Q_P(t)$  do hodnoty 1, tedy podle vztahu :

$$R_P(t) = 1 - Q_P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad , \text{ kde} \quad (5.6)$$

$R_i(t)$ ...pravděpodobnost bezporuchového provozu  $i$ -tého prvku

Pokud bude systém tvořen  $n$  prvky se stejnou intenzitou poruch  $\lambda$ , pak závislost bezporuchového provozu systému  $R_P(t)$  na normovaném čase  $\lambda t$  znázorňuje Obrázek 16: Závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému  $R_P(t)$  na normovaném čase  $\lambda t$ .



**Obrázek 16: Závislost pravděpodobnosti bezporuchového stavu systému  $R_P(t)$  na normovaném čase  $\lambda t$**

***Střední doba bezporuchového stavu paralelního systému:***

Střední doba bezporuchového provozu paralelního systému je dána vztahem :

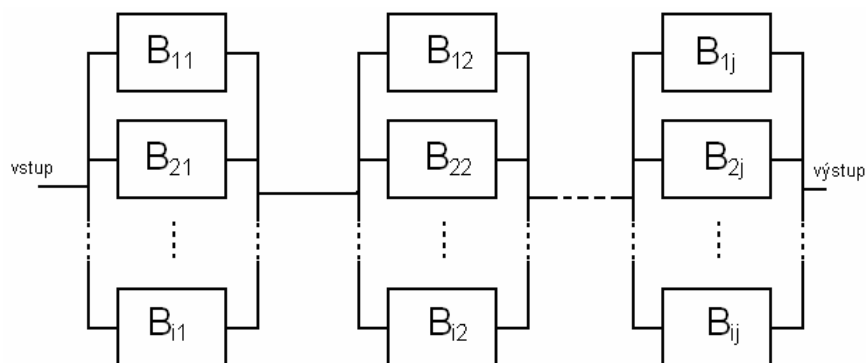
$$T_s = \frac{1}{\lambda_p} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad [\text{s}] \quad , \text{ kde} \quad (5.7)$$

$\lambda_p$  ...intenzita poruch systému, je dána součinem intenzit poruch ,  
jednotlivých prvků  $\lambda_i$  ,  
 $i$  ... pořadí prvku.

### 5.1.3 Kombinované spolehlivostní modely

Kombinované spolehlivostní modely jsou kombinací sériového a paralelního modelu. Jsou-li uspořádány pravidelně, rozlišují se *sériově-paralelní* a *paralelně-sériové* modely.

#### 1. Sériově-paralelní spolehlivostní modely:



**Obrázek 17: Sériově-paralelní spolehlivostní model [ 1]**

Sériově-paralelní spolehlivostní model je znázorněn na obrázku Obrázek 17. Skládá se ze sériového spojení  $n$  paralelních podsystémů složených z  $m$  prvků.

**Pravděpodobnost bezporuchového provozu:**

Zanedbá-li se pro jednoduchost závislost na čase, dá se vyjádřit pravděpodobnost bezporuchového provozu sériově-paralelního systému  $R_{SP}$  vztahem

$$R_{SP} = \prod_{j=1}^n (1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_{ij})) \quad , \text{ kde} \quad (5.8)$$

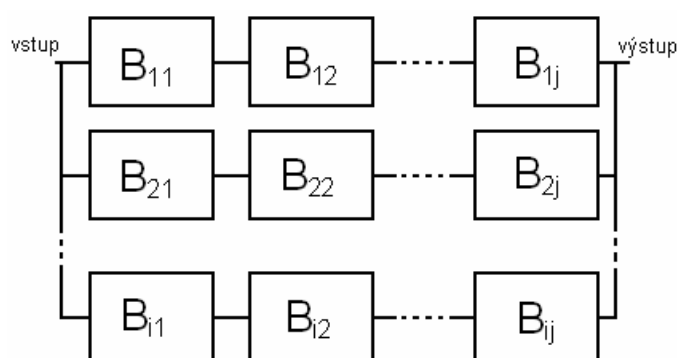
$R_{ij}$ ...pravděpodobnost bezporuchového provozu jednotlivých prvků,

$m$ ...počet prvků podsystému,

$n$ ...počet paralelních podsystémů.

**2. Paralelně sériové spolehlivostní modely**

Paralelně-sériový model je znázorněn na obrázku Obrázek 18. Skládá se z  $m$  sériových podsystémů složených z  $n$  prvků.



**Obrázek 18: Paralelně-sériový spolehlivostní model [ 1]**

**Pravděpodobnost bezporuchového provozu:**



Zanedbá-li se pro jednoduchost závislost na čase, dá se vyjádřit pravděpodobnost bezporuchového provozu paralelně-sériového systému  $R_{PS}$  vztahem

$$R_{PS} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \prod_{j=1}^n R_{ij}) \quad , \text{ kde} \quad (5.9)$$

$R_{ij}$ ...pravděpodobnost bezporuchového provozu jednotlivých prvků,

$m$ ...počet sériových podsystémů,

$n$ ...počet prvků podsystému.

Za stejných podmínek je celková pravděpodobnost bezporuchového provozu  $R_{PS}$  menší než  $R_{SP}$ . Je to dáno tím, že u sériově-paralelního modelu vede větší počet cest ze vstupu na výstup. Sériově-paralelní model totiž zálohuje každý prvek, kdežto u paralelně sériového modelu je vždy zálohován celý podsystém. [ 3]

Na závěr je třeba dodat, že ne vždy se objevují kombinované modely takto uspořádané, čili s pravidelnou strukturou. To se řeší rozčleněním prvků do jednotlivých podsystémů.

## 5.2 MARKOVOVY PROCESY

Markovovy procesy se užívají pro výpočet spolehlivosti systémů se závislými prvky. Je to účinný prostředek pro číselné vyjádření spousta fyzikálních i chemických procesů. Vychází se z předpokladu, že existuje konečný počet stavů a že změny stavu se dějí v náhodných okamžicích. Vhodný dynamický model pro tuto situaci je stochastický abstraktní model s diskrétními stavy a spojitým časem, tedy diskrétní Markovův náhodný proces. [ 2]

Markovův proces (homogenní) je definován jako diskrétní náhodný proces složený z několika provozních stavů systému  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , kde pravděpodobnost  $p$  každého stavu  $a_i$  závisí pouze na stavu  $a_{i-1}$  a je nezávislá na ostatních stavech.

### ***Klasifikace stavů Markovových procesů***

Z hlediska aplikace Markovových procesů existují při výpočtech spolehlivostních ukazatelů význačné stavy systému. [ 3]

***Absorpční stav*** je to stav, ze kterého systém nemůže přejít za žádných okolností do stavu jiného. Potom v tomto stavu setrvává s pravděpodobností  $p=1$ .

***Rekurentní stav*** je stav, do kterého se systém během svého provozu vrátí s pravděpodobností  $p=1$ .

***Přechodný stav*** je stav, do kterého se proces v průběhu provozu vrátit nemusí. Návrat do tohoto stavu má pravděpodobnost  $p<1$ .

### ***Výhody aplikací Markovových modelů***

Matematický aparát je vypracován pro různé struktury systémů. Řešení spočívá v řešení diferenciálních a lineárních algebraických rovnic.

Tyto modely jsou vhodné pro efektivní řešení zálohovaných systémů, opravovaných systémů a systémů se složitou strukturou. [ 1]

### ***Omezení pro Markovovy modely***

Markovovy modely jsou definovány pro výpočet parametrů spolehlivosti systémů s exponenciálním rozdělením bezporuchovosti a obnovitelnosti.

Řešení i velmi jednoduchých systémů pomocí Markovových modelů je poměrně složité a pracné. Řešení složitých systémů pak vede na soustavu rovnic, jejichž počet narůstá s počtem prvků systémů a jejich stavů. [ 3]

Podrobné odvození matematického aparátu pro výpočet spolehlivosti pomocí Markovových procesů a jeho aplikace jsou poměrně složité a tudíž zde nejsou uvedeny. Najít je lze v odborné literatuře.

### 5.3 STATISTICKÉ MODELOVÁNÍ METODOU MONTE CARLO

Toto modelování je na rozdíl od předešlých analytických metod záležitostí pokusů nejčastěji s využitím počítače. Vychází se ze znalosti intenzity poruch  $\lambda$  jednotlivých prvků a jejich zákona rozdělení pravděpodobnosti. [ 2]

Pro realizaci je nutný dostatečně velký soubor náhodných čísel, jehož rozdělení dané distribuční funkcí  $F(x)$  a hustota pravděpodobnosti  $f(x)$  odpovídají rozdělení a hustotě poruch modelovaného prvku. Obvykle se vychází ze souboru čísel z intervalu  $(0,1)$  s rovnoměrným rozdělením. Tato náhodná čísla se pak přetransformují pomocí vhodné transformace na soubor čísel s požadovaným rozdělením  $F(x)$ . [ 3]

Tato transformace se provede podle následujícího vztahu :

$$y_i = \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx \quad , \text{ kde} \quad (5.10)$$

$y_i$ ...přetransformované náhodné číslo,

$x_i$ ...transformované číslo (původní náhodné číslo z intervalu  $(0,1)$ ),

$f(x)$ ...hustota pravděpodobnosti.

#### *Použití metody Monte Carlo*

Výhodou modelování metodou Monte Carlo je, že umožňuje určit spolehlivostní vlastnosti systémů s různými podsystemy a různými rozděleními pravděpodobnosti. Řešení složitých systémů však vyžaduje speciální rozbor, kterým by se daly eliminovat z výpočtu nevýznamné jevy. Tato metoda je tedy vhodná spíše pro strukturální analýzu složitých systémů při jejich počátečním návrhu.

## 6. SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY

Spolehlivostní analýzy jsou určeny pro výpočet spolehlivostních ukazatelů, tedy k určení spolehlivosti systémů. Existují dva základní druhy analýzy. Jedna z nich vychází z tzv. vrcholové události a směřuje k jevům na nižší úrovni. Tato analýza se nazývá Analýza stromu poruch FTA. Druhá z nich zase směřuje od jevů na nižších úrovních systému až k vrcholové události. Nazývá se Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA. [ 7], [ 4]

### 6.1 ANALÝZA STROMU PORUCH FTA

Analýza stromu poruch FTA (Fault Tree Analysis) využívá model ve formě stromu poruch. Využívá se zejména pro rozbor spolehlivosti systémů se složitou strukturou.

Princip je založen na přiřazování hlavnímu definovanému jevu, tedy vrcholové události (top event), pomocí logických funkcí AND, OR a NOT, jeho dílčí složky. [ 3] Hlavním jevem je zde myšlena zejména porucha systému či podsystému a dílčí složka označuje poruchu některého prvku systému. [ 9]

#### ***Strom poruch***

Jako grafický spolehlivostní model daného systému slouží strom poruch, který využívá logické funkce pro vyjádření vztahů mezi poruchou jednotlivých prvků a celého systému.

Rozbor spolehlivosti pomocí modelu stromu poruch se stává z následujících kroků:

- definice systému a stanovení kritérií poruch,
- konstrukce stromu poruch,
- určení parametrů spolehlivosti jednotlivých prvků,
- výpočet a zhodnocení systému.

### ***Podmínky pro analýzu stromu poruch FTA***

Použití analýzy stromu poruch FTA je podmíněno dvěma základními podmínkami, kterými jsou:

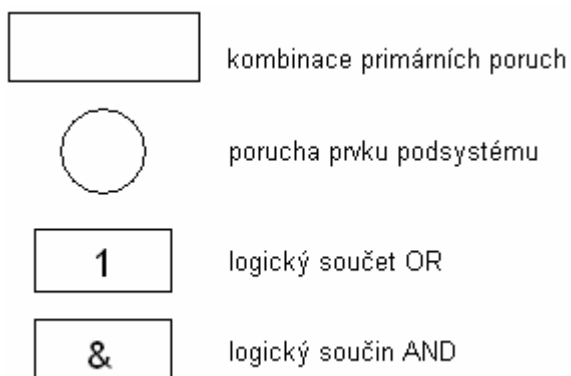
- hlavní jev, tedy porucha systému, musí vzniknout působením dílčích jevů, tedy poruchou jednotlivých prvků,
- hlavní jev musí být možno definovat, měřit a jednoznačně ho určit .

Definice probíhá na základě blokového schématu systému. Konstrukce se provádí od výstupu nebo z bodu, kde dochází k rozhodování o provozuschopnosti systému a postupuje se od vyšších celků k jednotlivým prvkům. Vazby mezi jednotlivými kroky rozboru jsou tvořeny pomocí logických operací (AND, OR, NOT). [ 7]

Výpočet parametrů spolehlivosti se provádí řešením logických rovnic sestavených pomocí stromu poruch a převodem logických vztahů na pravděpodobnostní závislosti.

### ***Symbyoly používané pro tvorbu stromu poruch***

Při konstrukci stromu poruch se používají tyto symbyoly, viz Obrázek 19.

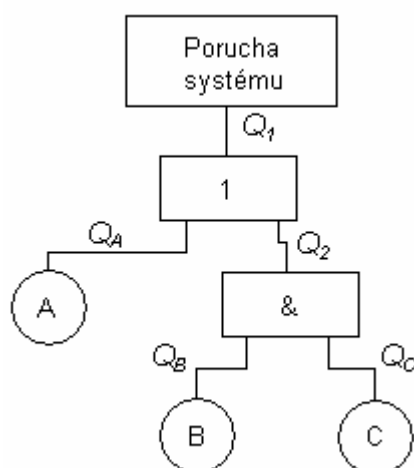


**Obrázek 19: Symbyoly používané pro konstrukci stromu poruch**

Příklad stromu poruch je uveden na obrázku

Obrázek 20. Hlavní jev, neboli vrcholová událost, je zde označena jako *Porucha systému*. Celý systém se skládá ze tří podsystémů

A, B, C. Výsledek logického součinu pravděpodobností poruchy  $Q_B$  a  $Q_C$  podsystémů B a C je označen jako pravděpodobnost poruchy  $Q_2$ . Výsledkem logického součtu pravděpodobností poruchy  $Q_A$  a  $Q_2$  je pravděpodobnost poruchy  $Q_1$ , což představuje poruchu systému. Z těchto závislostí lze tedy sestavit logické rovnice. Jejich převodem na pravděpodobnostní závislosti lze získat popis spolehlivosti systému.



**Obrázek 20: Příklad stromu poruch systému**

### ***Výhody analýzy stromu poruch FTA***

Hlavní výhodou analýzy pomocí stromu poruch je, že přehledně zobrazuje jakým způsobem přispívají jednotlivé prvky k poruchovosti celého systému. Tím umožňuje také stanovit důležitost jednotlivých prvků z hlediska spolehlivosti. [ 9]

Díky své názornosti a přehlednosti se dá také poměrně rychle lokalizovat porušený prvek.

Analýza pomocí stromu poruch je velmi efektivní i v případě několika různých poruch vyskytujících se v systému. [ 3]

### ***Nevýhody analýzy stromu poruch FTA***

Jistou nevýhodou představuje fakt, že pomocí této metody lze velmi obtížně analyzovat obnovované systémy. Dále by se mohla jako nevýhoda jevit pracnost metody pro složitější systémy.

I přes některé nevýhody této analýzy je analýza stromu poruch FTA velmi efektivní a často používanou metodou.

## **6.2 ANALÝZA ZPŮSOBŮ A DŮSLEDKŮ PORUCH FMEA**

Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) je strukturovaná kvalitativní analýza. Slouží, jak je z názvu patrné, k identifikaci způsobů projevu poruchy, jejich příčin a také jejich důsledků. [ 4]

Tato metoda vychází z nižších úrovní systému, tedy od jednotlivých prvků systému a jejich charakteristik. Důležité je určení vazeb mezi poruchami jednotlivých prvků a poruchou celého systému, provozními omezeními nebo selháním funkce.

### ***Podmínky pro analýzu FMEA***

Pro použití analýzy FMEA je důležité zejména zajištění následujících dvou podmínek:

- definice skladby systému,
- definice podmínek prostředí.

Definice skladby systému probíhá na základě znalosti několika informací. Těmito informacemi jsou myšleny zejména přehled prvků systému, znalost jejich parametrů, úloh a funkcí, dále určení vazeb mezi jednotlivými prvky a v neposlední řadě také informace o úrovni zálohování a způsobu zálohování. Dále je nutné specifikovat provozní režimy systému a požadavky na jeho údržbu.

Znalost podmínek provozního prostředí je pro tuto analýzu rovněž velmi důležitá. Analýza by měla zahrnout všechny okolní vlivy působící na daný systém. V případě nesrovnalostí provozních podmínek s předpokládanými podmínkami je nutné tyto nesrovnalosti do analýzy zahrnout. Tím dojde ke zpřesnění výsledků. [ 7]

### ***Postup analýzy FMEA***

Tato metoda využívá stejně jako většina ostatních metod model systému. Nejčastěji pak tzv. blokové diagramy. Každý z bloků blokového diagramu představuje určitou funkci. Spojnice, jimiž jsou jednotlivé bloky pospojovány, představují vstupy a výstupy bloků, tedy dané funkce. [ 7]

Prvním krokem při analýze FMEA je volba nejnižší úrovně systému, o které existuje dostatek informací. Sestaví se tabulka obsahující seznam jednotlivých prvků systému a způsob jejich poruch. Dalším krokem je přechod na vyšší úroveň. Zde se vychází ze znalosti důsledků poruch základních prvků, které jsou považovány za způsob poruchy prvků na vyšší úrovni. Takto se postupuje až do doby, kdy je vyhodnocen systém jako celek. Výsledkem této analýzy je tedy většinou tabulka obsahující seznam jednotlivých prvků systému, způsob jejich poruch a důsledky na celý systém.

### ***Použití analýzy FMEA***

Tato analýza se používá zejména při studiu spolehlivosti materiálů a zařízení. Je poměrně univerzální, tudíž lze použít pro systémy elektrické, mechanické, apod. . Její uplatnění je tedy široké.

### ***Výhody***

Metoda lze použít již v etapě návrhu a vývoje, kde slouží k přezkoumání návrhu jako tzv. metoda předběžného varování. Má tedy zabránit pozdějším problémům vyplývajícím z nespolehlivosti systému.

Další výhodou této metody je, že výstupní informace lze použít pro určení provozních podmínek zařízení, k jeho údržbě a v neposlední řadě také k jeho ovládání.



### ***Nevýhody***

Při použití pro systémy složené z mnoha komponent nebo pro systémy s mnoha funkcemi je tato metoda poměrně zdlouhavá a složitá, což je její hlavní nevýhodou.

Při použití FMEA nejsou často zahrnuty do výpočtů vlivy okolního prostředí, neboť by bylo nutné je přesně vyjádřit. Při výpočtu nejsou brány v potaz ani chyby zaviněné člověkem. To by mohlo v některých případech představovat značné omezení. [ 4]

Některé tyto nevýhody jsou však potlačeny kombinací FMEA s jinými metodami.

## **6.3 ANALÝZA ZPŮSOBŮ, DŮSLEDKŮ A KRITICHNOSTI PORUCH FMECA**

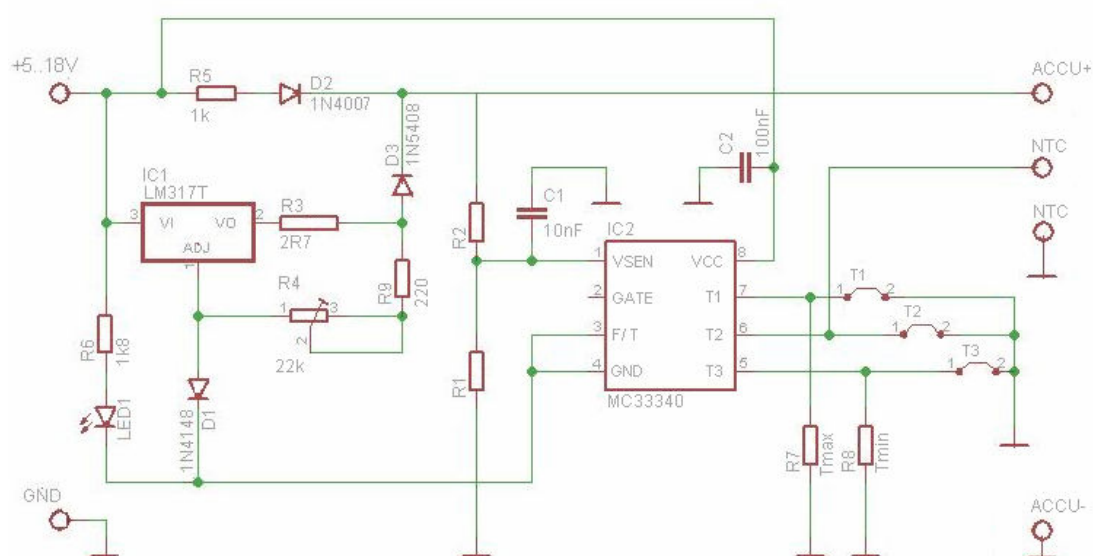
Závažnost následků poruch se nejčastěji kvantitativně vyjadřuje tzv. kritičností poruchy. V závislosti na snížení provozuschopnosti systému a různých nebezpečích se kritičnost poruch dělí do několika tříd. Analýza FMEA však neumí kritičnost vyhodnotit. Proto se v tomto případě často využívá Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), která zahrnuje právě i odhad kritičnosti důsledků poruch a pravděpodobnosti jejich výskytu. [ 4]

Výstup z metody FMECA bývá vyjádřen využitím matice kritičnosti, znázorňující jednotlivé příčiny poruchy v závislosti na jejich kritičnosti a závažnosti výskytu poruchy.

Analýza FMECA je pouze určitým doplněním, resp. rozšířením analýzy FMEA. Má tedy stejné vlastnosti, včetně většiny výhod a nevýhod.

## 7. PŘÍKLAD SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZY

V této kapitole bude ukázán na konkrétním příkladu výpočet spolehlivosti – spolehlivostní analýza. Zkoumaným objektem bude Univerzální nabíječ NiCd a NiMH akumulátorů. Schéma zapojení tohoto obvodu je uvedeno na obrázku Obrázek 21.



**Obrázek 21:** Schéma zapojení *Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů*

Zapojení bylo nepatrně modifikováno z důvodu přizpůsobení danému akumulátoru NiMH 1,2 V o kapacitě 1000 mAh. Byl odebrán rezistor R1 a hodnota rezistoru R3 byla změněna na hodnotu  $R3 = 1,5 \Omega$ . Rezistory R7 a R8 se využívají při měření teploty akumulátoru termistorem NTC, kterým není model vybaven, tudíž nejsou tyto rezistory rovněž součástí zapojení.

Seznam použitých součástek je uveden v tabulce Tabulka 2.

Označení	Popis
R2	rezistor 10 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný
R3	rezistor 1,5 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný
R4	rezistor 22 k $\Omega$ , trimr, cermetový
R5	rezistor 1 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný
R6	rezistor 1,8 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný
R9	rezistor 220 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný
C1	kondenzátor 10 nF, keramický
C2	kondenzátor 100 nF, keramický
D1	dioda 1N4148
D2	dioda 1N4007
D3	dioda 1N5408
LED	LED dioda 5mm/20mA
IC1	integrováný obvod LM317T
IC2	integrováný obvod MC33340D
DPS	Deska plošného spoje T066

**Tabulka 2: Seznam použitých součástek**

## 7.1 BLOKOVÝ SPOLEHLIVOSTNÍ MODEL UNIVERZÁLNÍHO NABÍJEČE NICD A NIMH AKUMULÁTORŮ

Protože žádný z prvků v daném systému není zálohován, dá se tento systém popsat jako sériový blokový spolehlivostní model. Předpokladem tedy je, že porucha kteréhokoli prvku systému způsobí poruchu celého systému.



**Obrázek 22: Blokový spolehlivostní model *Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů***

Na obrázku Obrázek 22 je znázorněn blokový spolehlivostní model daného systému. Jednotlivé bloky  $B_i$  reprezentují jednotlivé součástky.

Protože by bylo poměrně složité přesně určit zatížení jednotlivých součástek a striktně definovat okolní vlivy, tedy typ prostředí, teplotu okolí, apod. , bude spolehlivost jednotlivých prvků vyjádřena pomocí střední hodnoty intenzity poruch  $\lambda_S$  určené pro následující podmínky :

- teplota okolí :  $t = 50^\circ\text{C}$ ,
- zatížení : 50% jmenovitého zatížení,
- prostředí : pozemní, neklimatizované.

Spolehlivost jednotlivých součástek je tedy vyjádřena pomocí střední intenzity poruch  $\lambda_S$ . Střední intenzita poruch celého systému  $\lambda_C$  se potom vyjádří jako součet střední intenzity poruch  $\lambda_S$  jednotlivých prvků podle následujícího vztahu :

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^{15} \lambda_{Si} \quad [\text{h}^{-1}] \quad , \text{ kde} \quad (7.1)$$

$\lambda_{Si}$  ...střední intenzita poruch jednotlivých prvků.

Seznam prvků systému s uvedením střední intenzity poruch  $\lambda_S$  a střední intenzita poruch celého systému  $\lambda_C$  vypočtená podle vzorce (7.1) jsou uvedeny v tabulce Tabulka 3.

Prvek $i$	Součástka	Popis	$\lambda_S[10^{-9}\text{h}^{-1}]$
1	R2	rezistor 10 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
2	R3	rezistor 1,5 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
3	R4	rezistor 22 k $\Omega$ , trimr, cermetový	100
4	R5	rezistor 1 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
5	R6	rezistor 1,8 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
6	R9	rezistor 220 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
7	C1	kondenzátor 10 nF, keramický	250
8	C2	kondenzátor 100 nF, keramický	250
9	D1	dioda 1N4148	150
10	D2	dioda 1N4007	60
11	D3	dioda 1N5408	60
12	LED	LED dioda 5mm/20mA	1400
13	IC1	integrováný obvod LM317T	8500
14	IC2	integrováný obvod MC33340D	1800
15	T066	plošný spoj (34 pájecích plošek)	1
<b>Střední intenzita poruch celého systému <math>\lambda_C [10^{-9}\text{h}^{-1}]</math></b>			<b>12641</b>

**Tabulka 3 : Výpočet střední intenzity poruch systému  $\lambda_C$**

Střední intenzita poruch systému je tedy  $\lambda_C = 12641 \cdot 10^{-9} h^{-1}$ .

Výpočet dalších spolehlivostních ukazatelů, tedy pravděpodobnosti bezporuchového stavu, pravděpodobnosti poruchy, atd. lze provést využitím vztahů 5.1 – 5.4.

Z tabulky Tabulka 3 je patrné, že největší podíl na spolehlivosti systému mají integrované obvody. Pro přesné určení spolehlivosti tohoto systému, které by obsahovalo informace o zatížení jednotlivých prvků, jejich teplotu atd. neexistuje dostatek informací. Měření zatížení jednotlivých prvků by bylo velmi složité, zvláště právě u integrovaných obvodů, které, jak již bylo řečeno, mají na spolehlivost systému největší vliv.

Pro srovnání je v tabulkách Tabulka 4 až Tabulka 8 uveden zpřesněný výpočet intenzity poruch jednotlivých součástí pomocí vztahů 4.1 – 4.9 pro následující podmínky :

- teplota okolí :  $t = 25^{\circ}C$ ,
- zatížení : 50% jmenovitého zatížení,
- prostředí : pozemní, neklimatozované.

Dále je vypočtena, opět podle vztahu (7.1), intenzita poruch celého systému  $\lambda_C$  za těchto podmínek. Příklad výpočtu pro jednotlivé typy prvků je uveden níže.

#### Rezistory:

Prvek $i$	Rezistor	$\lambda_S [10^{-9} h^{-1}]$	$k_Z [-]$	$k_R [-]$	$k_E [-]$	$\lambda_P [10^{-9} h^{-1}]$
1	R2	14	0,50	1,000000	1	7,00
2	R3	14	0,50	0,000002	1	1,29E-05
3	R4	100	0,50	3,260000	1	163,00
4	R5	14	0,50	0,032000	1	0,22
5	R6	14	0,50	0,076000	1	0,53
6	R9	14	0,50	0,003300	1	0,02

**Tabulka 4: Zpřesněný výpočet intenzity poruch rezistorů**

Příklad výpočtu pro rezistor R1 :

$$\lambda_P = k_Z k_R k_E \lambda_S$$

$$\lambda_P = 0,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 10^{-9}$$

$$\underline{\underline{\lambda_P = 7 \cdot 10^{-9} h^{-1}}}$$

**Kondenzátory:**

Prvek <i>i</i>	Kondenzátor	$\lambda_S [10^{-9}h^{-1}]$	$k_Z [-]$	$k_C [-]$	$k_E [-]$	$\lambda_P [10^{-9}h^{-1}]$
7	C1	250	0,28	1,13	1	79,10
8	C2	250	0,28	1,45	1	101,50

**Tabulka 5: Zpřesněný výpočet intenzity poruch kondenzátorů**

Příklad výpočtu pro kondenzátor C1 :

$$\lambda_p = k_Z k_C k_E \lambda_S$$

$$\lambda_p = 0,28 \cdot 1,13 \cdot 1 \cdot 250 \cdot 10^{-9}$$

$$\lambda_p = 79,1 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

**Diody:**

Prvek <i>i</i>	Dioda	$\lambda_S [10^{-9}h^{-1}]$	$k_T [-]$	$k_U [-]$	$k_E [-]$	$\lambda_P [10^{-9}h^{-1}]$
9	D1	150	0,80	1	1	120,00
10	D2	60	1,75	1	1	105,00
11	D3	60	0,64	1	1	38,40
12	LED	1400	0,20	1	1	280,00

**Tabulka 6: Zpřesněný výpočet intenzity poruch diod**

Příklad výpočtu pro diodu D1 :

$$\lambda_p = k_T k_U k_E \lambda_S$$

$$\lambda_p = 0,80 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 150 \cdot 10^{-9}$$

$$\lambda_p = 120 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

**Integrované obvody:**

Prvek <i>i</i>	Integr. obvod	$k_L [-]$	$\lambda_S [10^{-9}h^{-1}]$	$k_T [-]$	$\lambda_{SE} [10^{-9}h^{-1}]$	$k_E [-]$	$\lambda_P [10^{-9}h^{-1}]$
13	IC1	1	400,00	22,00	850	1	9650,00
14	IC2	1	850,00	0,83	600	1	1305,50

**Tabulka 7: Zpřesněný výpočet intenzity poruch integrovaných obvodů**

Příklad výpočtu pro integrovaný obvod IC1 :

$$\lambda_p = k_L (k_T \lambda_S + k_E \lambda_{SE})$$

$$\lambda_p = 1 \cdot (22 \cdot 400 \cdot 10^{-9} + 1 \cdot 850 \cdot 10^{-9})$$

$$\lambda_p = 9650 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

**Plošné spoje:**

Prvek $i$	Plošný spoj	$\lambda_s [10^{-9}h^{-1}]$	$N [-]$	$k_E [-]$	$\lambda_p [10^{-9}h^{-1}]$
15	T066	1	39	1	39,00

**Tabulka 8: Zpřesněný výpočet intenzity poruch plošných spojů**

Příklad výpočtu pro plošný spoj T066 :

$$\lambda_p = N k_E \lambda_s$$

$$\lambda_p = 39 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-9}$$

$$\lambda_p = 39 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

Intenzita poruch celého systému  $\lambda_{CP}$  se vypočte opět jako součet intenzit poruch  $\lambda_p$  jednotlivých prvků podle vztahu 7.1 . Platí tedy :

$$\lambda_{CP} = \sum_{i=1}^{15} \lambda_{p_i} = \dots = 11889,28 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

Zpřesněná střední intenzita poruch systému pro dané podmínky je tedy

$\lambda_{CP} = 11889,28 \cdot 10^{-9} h^{-1}$ . Výpočtem zpřesněné intenzity poruch se ukázalo, že pro předpověď spolehlivosti, resp. spolehlivostních ukazatelů, vystačí tabulková hodnota. Tedy střední intenzita poruch  $\lambda_s$ . Tabulky s hodnotami lze nalézt v odborné literatuře, např. [ 3] [ 6] .

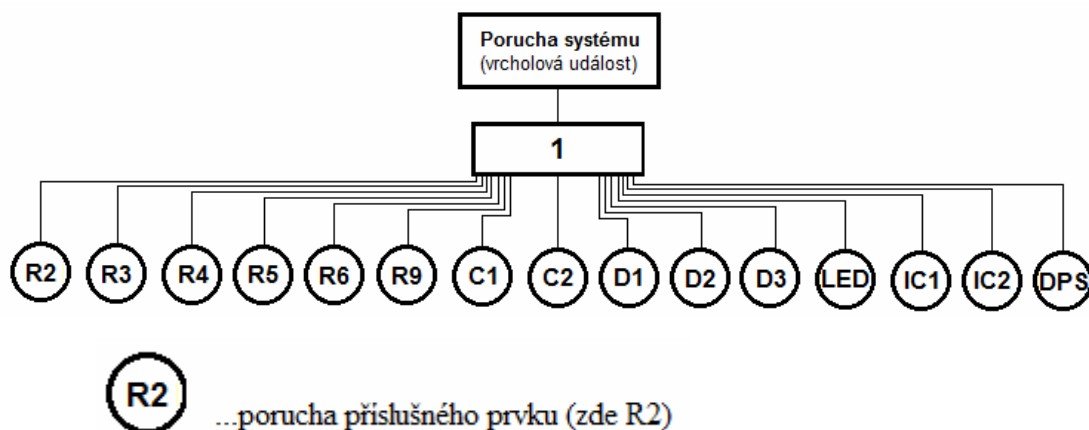
Výpočet dalších spolehlivostních ukazatelů, tedy pravděpodobnosti bezporuchového stavu, pravděpodobnosti poruchy, atd. lze provést využitím vztahů 5.1 – 5.4 .

## 7.2 ANALÝZA VE FORMĚ STROMU PORUCH

Strom poruch vychází z nejvyšší úrovně systému, tedy od tzv. vrcholové události. V tomto případě je vrcholovou událostí porucha celého systému, tedy porucha univerzálního nabíječe NiMH a NiCd akumulátorů.

Jak již bylo řečeno při tvorbě blokového spolehlivostního modelu, žádný z prvků systému není zálohován a porucha kteréhokoli prvku způsobí poruchu celého

systému. Z toho vyplývá struktura stromu poruch. Celá situace je znázorněna na obrázku Obrázek 23.



Obrázek 23: Strom poruch Univerzálního nabíječe NiCd a NiMH akumulátorů

Strom poruch je tvořen vrcholovou událostí, kterou reprezentuje porucha celého systému. Tuto poruchu může způsobit porucha kteréhokoli prvku, v tomto případě součástky. Proto je porucha systému dána logickým součtem poruch jednotlivých prvků. Seznam a popis součástek vychází z tabulky Tabulka 2.

Prvek <i>i</i>	Součástka	Popis	$\lambda_s[10^{-9}h^{-1}]$
1	R2	rezistor 10 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
2	R3	rezistor 1,5 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
3	R4	rezistor 22 k $\Omega$ , trimr, cermetový	100
4	R5	rezistor 1 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
5	R6	rezistor 1,8 k $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
6	R9	rezistor 220 $\Omega$ , vrstvý-metalizovaný	14
7	C1	kondenzátor 10 nF, keramický	250
8	C2	kondenzátor 100 nF, keramický	250
9	D1	dioda 1N4148	150
10	D2	dioda 1N4007	60
11	D3	dioda 1N5408	60
12	LED	LED dioda 5mm/20mA	1400
13	IC1	integrováný obvod LM317T	8500
14	IC2	integrováný obvod MC33340D	1800
15	T066	plošný spoj (34 pájecích plošek)	1
Střední intenzita poruch celého systému $\lambda_c [10^{-9}h^{-1}]$			12641

Tabulka 9: Výpočet střední intenzity poruch systému pomocí FTA



Spolehlivost jednotlivých prvků je popsána střední intenzitou poruch  $\lambda_S$ , viz Tabulka 9. Ze stromu poruch na obrázku Obrázek 23 vyplývá, že střední intenzita poruch celého systému  $\lambda_C$  se vypočítá jako součet střední intenzity poruch  $\lambda_S$  jednotlivých prvků podle vztahu (7.1).

Střední intenzita poruch celého systému je tedy  $\lambda_C = 12641 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ .

### 7.3 ANALÝZA FMEA

Analýza FMEA vychází z popisu systému ve formě blokového diagramu, resp. blokového modelu. Postup analýzy je vzestupný, čili vychází od prvků na nejnižší úrovni směrem k vyšším úrovním systému. Nejvyšší úroveň je pak reprezentována poruchou celého systému. V případě *Univerzálního nabíječe NiMH a NiCd akumulátorů* je blokový model poměrně jednoduchý, viz Obrázek 22. Postup analýzy FMEA v tomto případě odpovídá výpočtu spolehlivosti pomocí blokového modelu. Dále také nejsou k dispozici žádné bližší informace, které by měly vliv na spolehlivost. Z toho důvodu není tedy nutné analýzu FMEA aplikovat, neboť výsledek bude shodný s výsledkem získaným právě u výpočtu pomocí blokového modelu.

## 8. ANYLÝZA CÍLŮ

Cílem této práce bylo vytvořit přehled nejčastěji používaných metod pro předpovídání spolehlivosti technických systémů a na praktickém příkladu demonstrovat použití jednotlivých metod.

Pro demonstraci analýzy spolehlivosti byl vybrán *Univerzální nabíječ NiMH a NiCd akumulátorů*. Při analýzách spolehlivosti se často objevoval problém s neúplnými informacemi. Nejsou totiž k dispozici informace o provozním prostředí, o zatížení jednotlivých prvků apod. Získání těchto informací je samo o sobě poměrně složité. Ovšem jak bylo ukázáno na příkladu, není někdy nutné všechny informace podrobně znát. Stejně jako v tomto případě. Spolehlivost lze totiž určit i z tabulkových hodnot a celková hodnota se pak nějak markantně neliší od hodnoty získané zpřesněným výpočtem. Zpřesněné výpočty jsou požadovány pouze u aplikací, kde by nepřesný výsledek měl nějaký zásadní význam.

Pro analýzu byly vybrány následující metody: výpočet pomocí blokového spolehlivostního modelu, FTA a FMEA. Každá z metod byla aplikována pro zjištění střední intenzity poruch celého systému  $\lambda_C$ . Všechny metody vedly v tomto případě ke stejnému výsledku, a sice že střední intenzita poruch systému  $\lambda_C = 12641 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ .

Výsledek si lze představit jako počet poruch za hodinu. Tato hodnota je velice malá. Z toho důvodu bude výsledek srozumitelnější po následujícím přepočtu na počet poruch za 1 rok a za 10 let.

Střední intenzita poruch systému  $\lambda_C$  za 1 den, tedy 24h:

$$\lambda_C = 12641 \cdot 10^{-9} \cdot 24 = 303,384 \cdot 10^{-6}$$

Střední intenzita poruch systému  $\lambda_C$  za 1 rok, tedy 365 dnů:

$$\underline{\lambda_C} = 303,384 \cdot 10^{-6} \cdot 365 = \underline{0,111}$$

Střední intenzita poruch systému  $\lambda_C$  za 10 let:

$$\underline{\lambda_C} = 0,111 \cdot 10 = \underline{1,107}$$

Intenzitu poruch systému  $\lambda_C$  lze tedy chápat jako **0,111** poruchy za 1 rok nebo **1,107** poruchy za 10 let.

## ZÁVĚR

Spolehlivost je velice důležitou vlastností systému. Stejně jako celá řada dalších vlastností systému je ovlivněna nejen strukturou a skladbou systému, ale také provozními podmínkami a podmínkami prostředí, ve kterém se daný systém nachází.

Cílem této práce bylo vypracovat přehled nejčastěji používaných metod předpovídání a určení spolehlivosti technických systémů, tedy spolehlivostních analýz, a zhodnotit výhody a nevýhody jejich použití. Dále pak ukázat na konkrétním příkladu výpočet spolehlivosti.

Jednou z nejuniverzálnějších spolehlivostních analýz je analýza FMEA (Analýza způsobů a důsledků poruch). Je vhodná pro použití v široké oblasti různých odvětví. Velice často se používá již při návrhu systému, aby se předešlo právě nespolehlivosti. Využití je velice vhodné pro systémy, u kterých je předem známa určitá hranice možného rizika. Její hlavní výhodou jsou její výstupní informace. Tvoří přehlednou zprávu, nejčastěji ve formě tabulky, o způsobech poruch jednotlivých prvků a jejich dopad na celý systém.

Rozšířením FMEA na analýzu FMECA (analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch) lze získat informace i o závažnosti následků poruchy systému. Některé její nevýhody se dají eliminovat nebo alespoň potlačit kombinací FMEA (FMECA) s některou další analýzou, čehož se v praxi také velice často využívá.

Další velice často používanou analýzou je analýza FTA (Analýza stromu poruch). Základem této analýzy je konstrukce tzv. stromu poruch. Její hlavní předností je její jednoduchost a názornost. Lze tedy poměrně snadno a rychle určit, jakým způsobem přispívá určitý prvek k poruchovosti systému. Jistou nevýhodou však představuje velmi obtížná analýza obnovovaných systémů. Stejně jako u analýzy FMEA i zde se velice často používá kombinace s některou z dalších analýz. Nejčastěji se aplikuje právě po použití FMEA.

Analýzy FMEA (resp. FMECA) a FTA jsou tedy nejpoužívanějšími spolehlivostními analýzami technických systémů.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [ 1] HLAVIČKA, J.: *Diagnostika a spolehlivost*. Vysokoškolská skripta. Praha: ČVUT, 1998. 153 s.
- [ 2] LEITL, R.: *Spolehlivost elektrotechnických systémů*. Praha: SNTL, 1990. 288 s. ISBN 80-03-00408-X
- [ 3] BEDNAŘÍK, J.: *Technika spolehlivosti v elektronické praxi*. Praha: SNTL, 1990. 336 s. ISBN 80-03-00422-5
- [ 4] ČSN IEC 812 : *Metody analýzy spolehlivosti systémů*. Praha: Český normalizační institut, 1992. 32 s.
- [ 5] FAJMON, B., RŮŽIČKOVÁ I.: *Matematika 3*. Vysokoškolská skripta. Brno: VUT, 2006.
- [ 6] MIL-HDBK-217 D : *Vojenská norma, Předpovídání spolehlivosti elektronických zařízení I. a II. díl*. 1982.
- [ 7] POLSTEROVÁ H.: *Spolehlivost v elektrotechnice*. Vysokoškolská skripta. Brno: VUT, 2003.
- [ 8] MALEC, Z.: *Technická diagnostika*. Brno, VUT, 1991
- [ 9] SMITH, D., SIMPSON, K. : *Functional Safety*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 258 s. ISBN 0-7506-6269-7